名家通识讲座书系

□ 吴鑫基 温学诗 著

现代天文学十五讲

灿烂星空，浩瀚宇宙，
最神秘，最引人入胜；
从古至今，不断探索，
最持久，最永无止境。

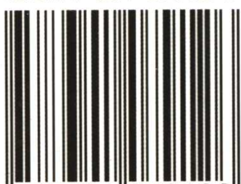


北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

历经几千年的观察、思考、探讨和求索，今天，一门能够正确认识宇宙的学科已经形成，这就是现代天文学。从地面到太空，通过全波段电磁波、中微子、引力波、宇宙线等一系列观测手段，它获得许多惊人的新发现，展示出揭示宇宙奥秘的巨大能力。它与众多学科紧密结合、相互交融、相互促进，它的每一次重大突破，都对整个基础科学，乃至人类文明的进程带来极大的震撼。

现代天文学十五讲

吴鑫基　温学诗　著

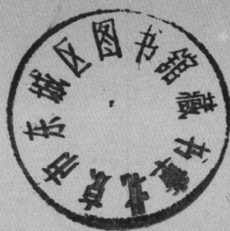


ISBN 7-301-07912-5

9 787301 079126

ISBN 7-301-07912-5/P · 0062　定价：37.00元





名家通识讲座书系

现代天文学十五讲

吴鑫基 温学诗 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

现代天文学十五讲/吴鑫基,温学诗著. —北京:北京大学出版社,2005.1

(名家通识讲座书系)

ISBN 7-301-07912-5

Ⅰ.现… Ⅱ.①吴… ②温… Ⅲ.天文学 Ⅳ.P1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 095147 号

书　　名:现代天文学十五讲

著作责任者:吴鑫基　温学诗　著

责 任 编 辑:顾卫宇

标 准 书 号:ISBN 7-301-07912-5/P·0062

出 版 发 行:北京大学出版社

地　　址:北京市海淀区中关村北京大学校内　100871

网　　址:http://cbs.pku.edu.cn

电 子 信 箱:zpup@pup.pku.edu.cn

电　　话:邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62752021

排 版 者:北京高新特打字服务社　51736661

印 刷 者:三河新世纪印务有限公司

经 销 者:新华书店

650 毫米×980 毫米　16 开本　28 印张　338 千字

2005 年 1 月第 1 版　2005 年 1 月第 1 次印刷

定　　价:37.00 元

太空中看到的地球和地月合影是如此之美丽



▲ 图1 “阿波罗”号宇航员在月球上空拍摄的地球照片。



▶ 图2　人类获得的第一张地月合影，是1992年由“伽利略”号空间探测器在飞往木星途中于距地球620万千米处拍到的。



◀ 图3 “阿波罗”号宇航员拍摄的地球照片，地球表面70.8%的海洋使它成为美丽的“蓝色水球”。

九大行星是亲兄弟，但它们的个性却各不相同

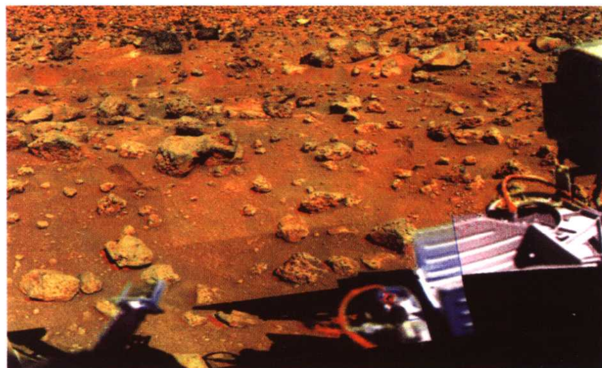


▲ 图4　太阳系九大行星的合成照片，从左边开始，按顺时针方向，分别是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。

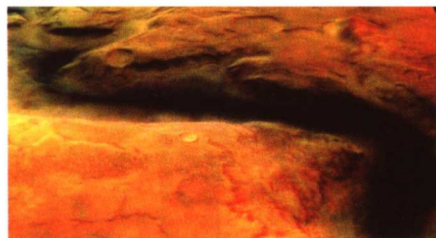


◀ 图5 木星在九大行星中不仅体积最大，同时拥有卫星也最多，就好像一个小型太阳系。这是木星大红斑和木星4个最大的卫星的合成照片，从右到左分别为木卫一、木卫二、木卫三、木卫四。由“伽利略”号探测器拍摄。

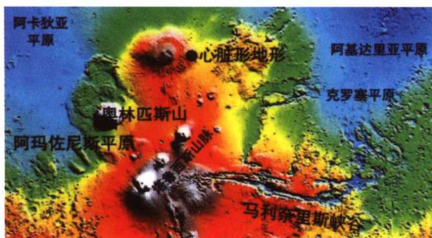
空间探测逐步加深人类对行星及其卫星的认识



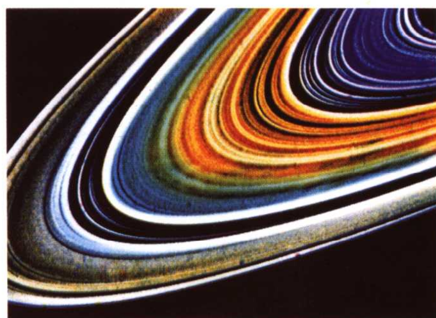
◀ 图6 “海盗”号探测器1976年首次成功地在一片荒凉的火星表面登陆，在火星表面进行了一系列生命检测实验，但没有发现生命存在的痕迹。



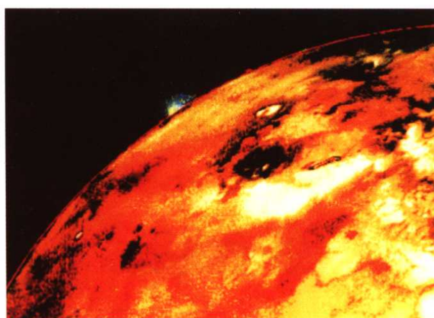
▲ 图7 2004年“火星快车”拍摄的火星局部地貌照片，发现这片区域曾经历水流冲刷的痕迹，形成照片上黑色的深沟。



▲ 图8 由“火星环球勘测者”测得数据绘制的火星立体地图（部分）。白色表示最高，红色次之，蓝色表示洼地。

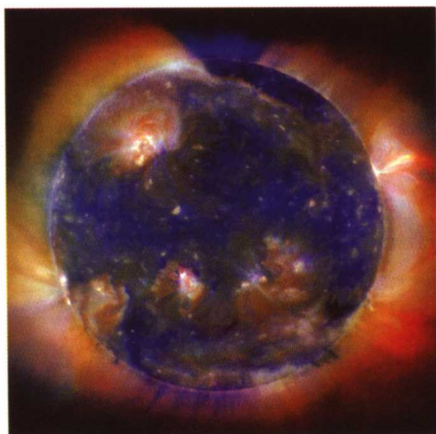


▲ 图9 土星由于拥有宽大明亮的光环而成为九大行星中最美的一个。“旅行者”号拍摄的土星光环照片显示出光环由无数条细环组成。

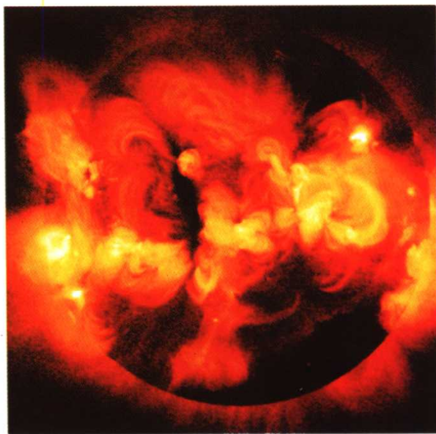


▲ 图10 “伽利略”号拍摄的木卫一的照片，捕捉到木卫一表面一个正在激烈喷发的火山。

看似平静的太阳，实际上却是波澜起伏、变化万千



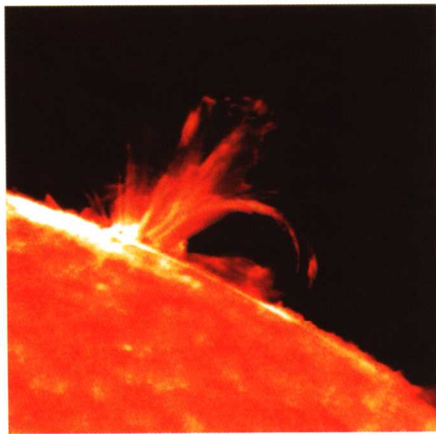
▲ 图11　SOHO卫星在远紫外波段拍摄的太阳高温日冕照片(3波段合成)，蓝色代表180万度，绿色为270万度，红色为360万度。



▲ 图12 日本“阳光”卫星在太阳第22周活动峰年拍摄的太阳X射线像。从图上可以看出太阳剧烈的活动情景和磁场的结构。



▲ 图13 TRACE(“太阳过渡区和日冕探测者”)卫星拍摄到的日冕局部照片，显示出日冕存在精细的结构。目前从理论上尚无法解释这一现象。

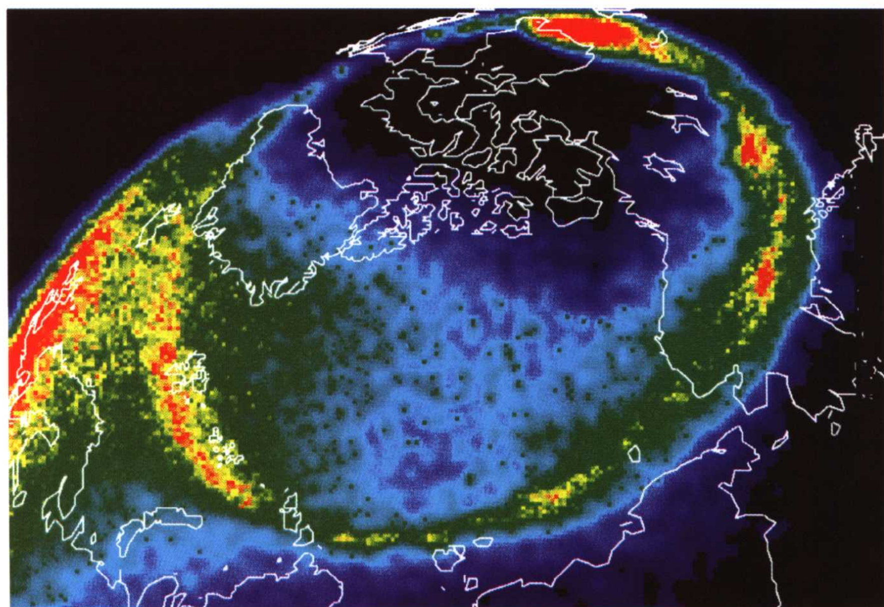


▲ 图14 耀斑是太阳表面最剧烈的活动现象，来得猛，去得快。这是TRACE卫星拍摄到的121.5纳米波段太阳圆面边缘的大耀斑。

极光的每一次出现，都是大自然恩赐给人类的美丽画卷

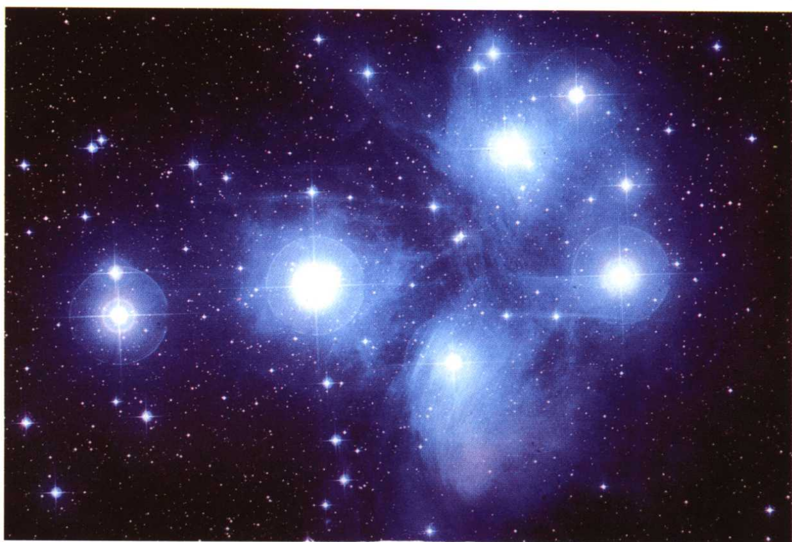


▲ 图15(左)和图16(右) 来自太阳活动区的带电高能粒子流与地球大气中的分子或原子碰撞而产生的放电过程，形成了形态变化万千，颜色绚丽多彩的极光。图15由M. Klensch 摄，图16由T. Dickinson 摄。



▲ 图17 瑞典 Viking 卫星上的加拿大的极光照相机拍摄的极光椭圆照片。从太阳来的等离子体与地球磁场相互作用形成一个以磁极为中心的椭圆形区域，沿其边界放电而发光。

球状星团和疏散星团是银河系中恒星聚集的地方



▲ 图18 最美丽的疏散星团:金牛座昴星团,其成员星约有100多颗,亮星周围白色的星云反射星光而光彩夺目。由英澳天文台摄。



▲ 图19 天蝎座中的球状星团: M80,形状呈椭球形,包含数以万计的恒星,越往中心密度越大,大型天文望远镜也无法将它们的成员分辨清楚。由哈勃空间望远镜拍摄。

由气体和尘埃微粒组成的星云绚丽多彩，很多是恒星诞生的地方



▲ 图20　银河系最具特色的暗星云：猎户座马头星云。暗星云不发光，在亮的星空背景衬托下，才让我们看见它。由英澳天文台摄。



▲ 图21 地面大型望远镜拍摄的巨蛇座鹰状星云照片，由于它的形状酷似翱翔的雄鹰而得名。由英澳天文台摄。

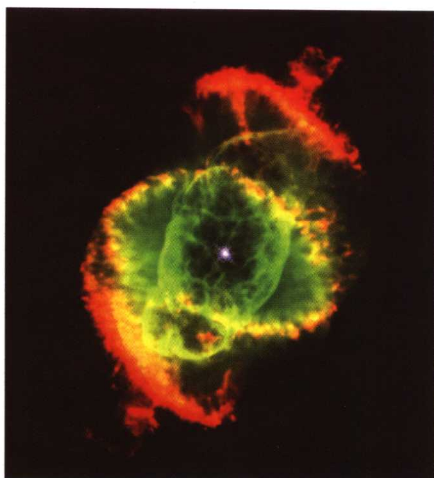


▲ 图22 哈勃空间望远镜拍摄的鹰状星云中心区域的照片，照片中明亮的部分被认为是孕育新生恒星的“温床”。

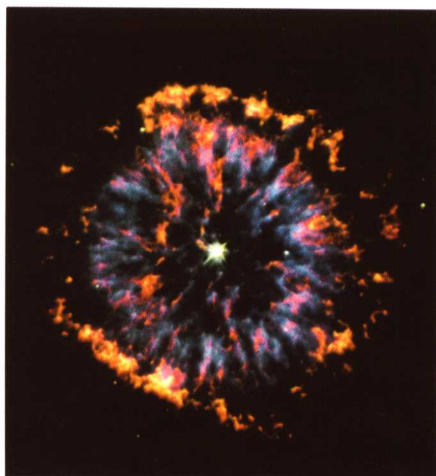
多姿多彩的行星状星云是中小质量恒星晚期演化的产物，是太空中最美丽的天体



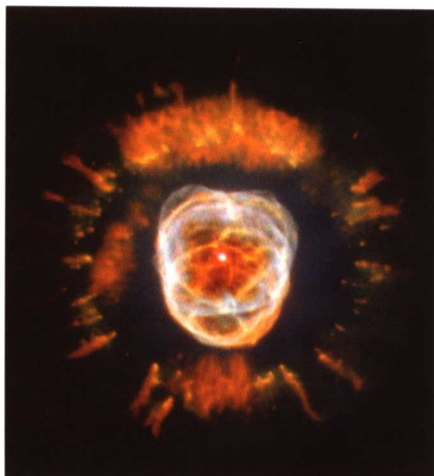
▲ 图23 苍蝇座行星状星云，奇特的形状好像一个沙漏，又称沙漏星云，在其中心有一颗白矮星。



▲ 图24 像猫眼睛一样的猫眼石星云(NGC6543)，从它的中心星向外，包围着好几层气体壳。

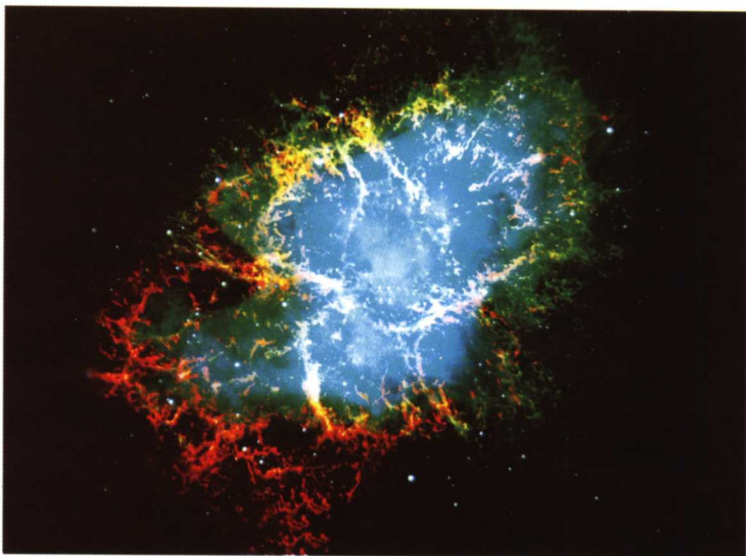


▲ 图25 位于天鹰座的行星状星云宛如天空中一只巨大的眼睛(NGC6751)。

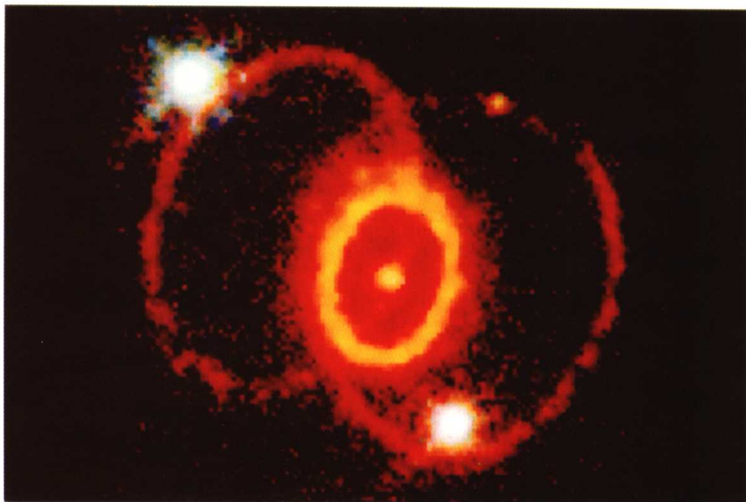


▲ 图26 看起来像爱斯基摩人脸庞的双子座行星状星云。图23-26均由哈勃空间望远镜拍摄。

大质量恒星晚期的归宿是超新星爆发，形成致密的中子星和呈弥漫星云状的遗迹



▲ 图27　欧南台拍摄的金牛座蟹状星云，这是中国宋史中记载的1054年出现的超新星的遗迹，1968年发现其中的一颗脉冲星。蟹状星云和它的脉冲星具有射电、光学、X射线、γ射线全波段辐射，成为天空中重要的物理实验室。

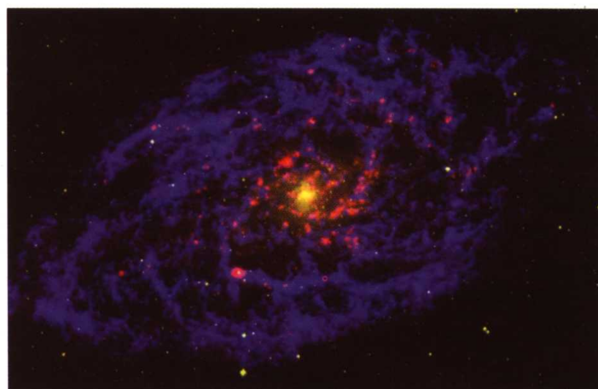


▲ 图28 哈勃空间望远镜拍摄的超新星1987A的遗迹。其形态特异，3个环一个套着一个，形成一个美妙绝伦的光链，成为又一个宇宙之谜。

旋涡星系是河外星系中数量最多、形态最美的一种



◀ 图29 欧南台甚大望远镜拍摄的波江座旋涡星系NGC1232。它正面朝向我们，使我们能够看清复杂的旋涡结构。



◀ 图30 美国甚大阵和荷兰综合口径射电望远镜在21厘米波长(中性氢气体)上对三角座旋涡星系M33的观测结果。



◀ 图31 哈勃空间望远镜拍摄的飞马座旋涡星系NGC7742。它的中心核球又大又亮，温度特别高，很活跃，被归为活动星系赛弗特Ⅱ型。

星系之间的相互吸引、碰撞，是宇宙中最壮观、最美丽的天象



◀ 图32 哈勃空间望远镜拍摄的玉夫座车轮星系。一个较大的旋涡星系被一个较小的星系从正面碰撞并穿过，形成巨大的车轮状结构。



◀ 图33 地面望远镜拍摄的乌鸦座天线星系NGC4038和4039以及哈勃空间望远镜拍摄的天线星系中心区域（线框内）。两个星系由于相互碰撞而发生了变形，形成一对天线似的结构。

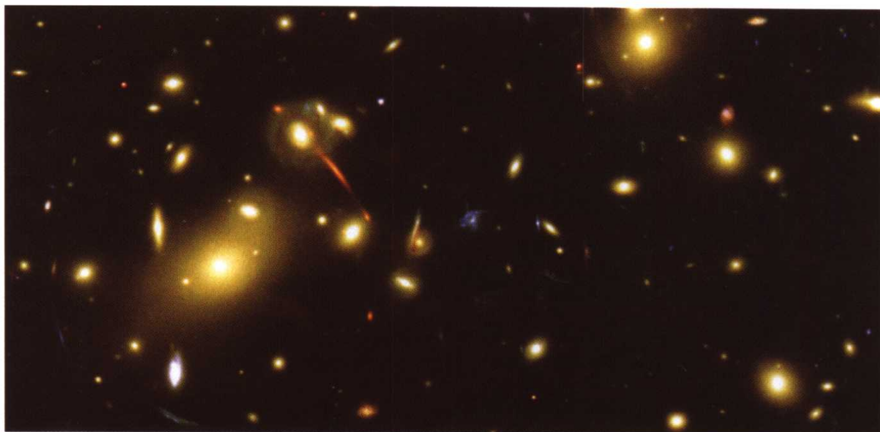


◀ 图34 哈勃空间望远镜拍摄的一对紧密相邻的旋涡星系NGC2207和IC2163。在大星系的拖拉作用下，小星系已经产生变形。

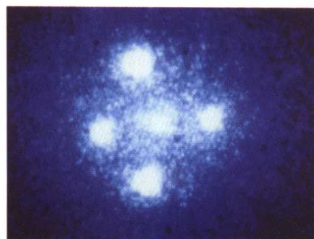
宇宙深处有数不清的星系也蕴藏着无穷的奥秘



▲ 图35 哈勃空间望远镜1995年12月拍摄的远在100亿～150亿光年范围内的宇宙深处的照片，由数百幅画面拼接而成。照片上密密麻麻的全都是遥远的星系。



▲ 图36 哈勃空间望远镜拍摄的引力透镜光弧：富星系团的巨大引力场使它后面星系的光线发生了偏折，形成一个个明亮或暗弱的光弧。



▶ 图37 著名的爱因斯坦十字引力透镜：图中央是引力透镜天体，它使在它后面的类星体G2237＋0305的光偏折，形成四个虚像。由哈勃空间望远镜拍摄。

《名家通识讲座书系》编审委员会

《名家通识讲座书系》总序

本书系编审委员会

《名家通识讲座书系》是由北京大学发起，全国十多所重点大学和一些科研单位协作编写的一套大型多学科普及读物。全套书系计划出版100种，涵盖文、史、哲、艺术、社会科学、自然科学等各个主要学科领域，第一、二批近50种将在2004年内出齐。北京大学校长许智宏院士出任这套书系的编审委员会主任，北大中文系主任温儒敏教授任执行主编，来自全国一大批各学科领域的权威专家主持各书的撰写。到目前为止，这是同类普及性读物和教材中学科覆盖面最广、规模最大、编撰阵容最强的丛书之一。

本书系的定位是"通识"，是高品位的学科普及读物，能够满足社会上各类读者获取知识与提高素养的要求，同时也是配合高校推进素质教育而设计的讲座类书系，可以作为大学本科生通识课（通选课）的教材和课外读物。

素质教育正在成为当今大学教育和社会公民教育的趋势。为培养学生健全的人格，拓展与完善学生的知识结构，造就更多有创新潜能的复合型人才，目前全国许多大学都在调整课程，推行学分制改革，改变本科教学以往比较单纯的专业培养模式。多数大学的本科教学计划中，都已经规定和设计了通识课（通选课）的内容和学分比例，要求学生在完成本专业课程之外，选修一定比例的外专业课程，包括供全校选修的通识课（通选课）。但是，从调查的情况看，许多学校虽然在努力建设通识课，也还存在一些困难和问题：主要是缺少统一的规划，到底应当有哪些基本的通识课，可能通盘考虑不够；课程不正规，往往因人设课；课量不足，学生缺少选择的空间；更普遍的问题是，很少有真正适合通识课教学的教材，有时只好用专业课教材替代，影响了教学效果。一般来说，综合性大学这方面情况稍好，其他普通的大学，特别是理、工、医、农类学校因为相对缺少这方面的教学资源，加上很

少有可供选择的教材，开设通识课的困难就更大。

这些年来，各地也陆续出版过一些面向素质教育的丛书或教材，但无论数量还是质量，都还远远不能满足需要。到底应当如何建设好通识课，使之能真正纳入正常的教学系统，并达到较好的教学效果？这是许多学校师生普遍关心的问题。从2000年开始，由北大中文系主任温儒敏教授发起，联合了本校和一些兄弟院校的老师，经过广泛的调查，并征求许多院校通识课主讲教师的意见，提出要策划一套大型的多学科的青年普及读物，同时又是大学素质教育通识课系列教材。这项建议得到北京大学校长许智宏院士的支持，并由他牵头，组成了一个在学术界和教育界都有相当影响力的编审委员会，实际上也就是有效地联合了许多重点大学，协力同心来做成这套大型的书系。北京大学出版社历来以出版高质量的大学教科书闻名，由北大出版社承担这样一套多学科的大型书系的出版任务，也顺理成章。

编写出版这套书的目标是明确的，那就是：充分整合和利用全国各相关学科的教学资源，通过本书系的编写、出版和推广，将素质教育的理念贯彻到通识课知识体系和教学方式中，使这一类课程的学科搭配结构更合理，更正规，更具有系统性和开放性，从而也更方便全国各大学设计和安排这一类课程。

2001年底，本书系的第一批课题确定。选题的确定，主要是考虑大学生素质教育和知识结构的需要，也参考了一些重点大学的相关课程安排。课题的酝酿和作者的聘请反复征求过各学科专家以及教育部各学科教学指导委员会的意见，并直接得到许多大学和科研机构的支持。第一批选题的作者当中，有一部分就是由各大学推荐的，他们已经在所属学校成功地开设过相关的通识课程。令人感动的是，虽然受聘的作者大都是各学科领域的顶尖学者，不少还是学科带头人，科研与教学工作本来就很忙，但多数作者还是非常乐于接受聘请，宁可先放下其他工作，也要挤时间保证这套书的完成。学者们如此关心和积极参与素质教育之大业，应当对他们表示崇高的敬意。

本书系的内容设计充分照顾到社会上一般青年读者的阅读选择，适合自学；同时又能满足大学通识课教学的需要。每一种书都有一定的知识系统，有相对独立的学科范围和专业性，但又不同于专业教科书，不是专业课

的压缩或简化。重要的是能适合本专业之外的一般大学生和读者，深入浅出地传授相关学科的知识，扩展学术的胸襟和眼光，进而增进学生的人格素养。本书系每一种选题都在努力做到入乎其内，出乎其外，把学问真正做活了，并能加以普及，因此对这套书作者的要求很高。我们所邀请的大都是那些真正有学术建树，有良好的教学经验，又能将学问深入浅出地传达出来的重量级学者，是请“大家”来讲“通识”，所以命名为《名家通识讲座书系》。其意图就是精选名校名牌课程，实现大学教学资源共享，让更多的学子能够通过这套书，亲炙名家名师课堂。

本书系由不同的作者撰写，这些作者有不同的治学风格，但又都有共同的追求，既注意知识的相对稳定性，重点突出，通俗易懂，又能适当接触学科前沿，引发跨学科的思考和学习的兴趣。

本书系大都采用学术讲座的风格，有意保留讲课的口气和生动的文风，有“讲”的现场感，比较亲切、有趣。

本书系的拟想读者主要是青年，适合社会上一般读者作为提高文化素养的普及性读物；如果用作大学通识课教材，教员上课时可以参照其框架和基本内容，再加补充发挥；或者预先指定学生阅读某些章节，上课时组织学生讨论；也可以把本书系作为参考教材。

本书系每一本都是“十五讲”，主要是要求在较少的篇幅内讲清楚某一学科领域的通识，而选为教材，十五讲又正好讲一个学期，符合一般通识课的课时要求。同时这也有意形成一种系列出版物的鲜明特色，一个图书品牌。

我们希望这套书的出版既能满足社会上读者的需要，又能够有效地促进全国各大学的素质教育和通识课的建设，从而联合更多学界同仁，一起来努力营造一项宏大的文化教育工程。

前　言

天文学是自然科学六大基础学科之一，这六大学科是数学、物理学、化学、天文学、地学和生物学。天文学的研究在于探索宇宙及它所包含的所有天体的本质，它与其它五门学科有着比较密切的关系。天文学的每一次重大突破，都对整个基础学科，乃至文明的进程带来巨大的震撼。现代天文学有三大特点。其一是进入了全电磁波段观测的时代。各个波段望远镜的发展吸取了当代最先进的尖端技术，同时也推动了技术的发展。以地面为基地的大型光学和射电望远镜和以太空为基地的 X 射线、γ 射线、紫外、红外望远镜相结合的全波段观测体系已经建成，并以其惊人的发现向世人展示了天文学家揭示宇宙奥秘的巨大能力。其二是天文空间探测已经有了长足的发展，不仅把望远镜送上了太空，而且宇航员还亲自登上月球进行实地探测和实验，发送探测器到火星、金星表面登陆进行考察，以及众多的宇宙飞船到各大行星附近去观测。建立以月球或火星为基地的天文台已成为天文学家探讨的实际课题。其三是已进入天文学和物理学紧密结合、相互促进的时代。从 20 世纪 70 年代开始，天文学的巨大成就已使 9 个天文项目 12 名天文学家荣获诺贝尔物理学奖，诺贝尔奖是当代科学的最高荣誉。诺贝尔物理学奖也已不再是物理学家的专利。

天文学是一门具有悠久历史的古老学科，它的发展基本上可分为三大阶段。古代天文学可以追溯到 5000 余年前，包括托勒密“地心说”统治的 1500 年。近代天文学则以哥白尼的“日心说”的建立为起点，直到

牛顿力学定律在天文学研究中广泛应用,天文学研究进入到理性的认识天体运动规律阶段。19 世纪中叶物理学的发展促进了揭示天体物理本质的天体物理学新学科的产生,标志着现代天文学的开始,到 19 世纪末 20 世纪初,物理学经历了从经典物理学到现代物理学过渡的发展阶段,天体物理学也从经典发展到新的阶段。本书第一讲将介绍天文学发展的历史。

一、现代天文学的三大观测手段

观测是天文学研究的主要实验方法。人类基本上只能被动地接收来自宇宙空间天体发来的电磁波、高能粒子和引力波。不仅被动,而且由于绝大多数天体离我们特别遥远,到达地球的能量非常微弱,因而观测起来特别困难。浩瀚的宇宙所包含的天体数目数也数不清,物理过程极其丰富,规模极其宏大,是地球上的所有实验室都无法相比的。来自宇宙的信息永远是人类取之不尽的知识源泉。观测手段越多、越好,所能得到的信息就越丰富。正因为如此,天文观测技术伴随着天文学的发展始终没有停止前进的步伐,一浪超过一浪,不断进步。目前,天文学的观测手段可以归纳为三种:光学、射电和空间。

从 1609 年意大利科学家伽利略发明了天文望远镜到现在已接近 400 年。这是天文学获得迅速发展的 400 年,在前 300 多年,光学望远镜几乎是获取天体信息的惟一来源,光学天文学也几乎成为天文学的代名词。近几十年来由于射电天文学和空间天文学的崛起使光学望远镜失去了霸主的地位,但是现代的光学望远镜技术的发展也是令人吃惊的,科学技术的蓬蓬勃勃发展带动了光学望远镜的突飞猛进。当年伽利略望远镜的口径仅仅 4 厘米多,而今全世界口径 8 米以上的大望远镜已经有十来台。特别是 1990 年,重达 11 吨、主镜口径 2.4 米的哈勃空间望远镜发射上太空,克服了地球大气的干扰,一下子使它的分辨率和灵敏度远远超出当时地面最强大的光学望远镜。然而,地面上的望远镜采用自适应光学系统和干涉等尖端技术以后,又在许多方面超越了哈勃空间

望远镜的观测能力。

和光学望远镜近400年的历史相比，射电望远镜仅有几十年，但是射电天文学很快就步入了鼎盛时期。20世纪60年代射电天文学的"四大发现"，即脉冲星、星际分子、宇宙微波背景辐射和类星体的发现成为20世纪中最为耀眼的天文学成就。射电天文已成为重大天文发现的发祥地和天文学家获诺贝尔奖的摇篮。1974年英国天文学家赖尔因发明综合孔径射电望远镜而荣获诺贝尔物理学奖是射电天文技术发展的一个标志性事件，使射电望远镜的分辨率、灵敏度和成像能力都能与光学望远镜媲美。甚长基线干涉观测和其世界性的联网观测更达到空前的分辨率，远远地把光学望远镜抛在后面。

空间天文学是在宇宙航行时代这个大环境下快速地发展起来的。红外线、紫外线、X射线和γ射线在电磁波谱中占据了相当大的部分，蕴藏着宇宙天体极其丰富的信息。从气球、火箭到人造卫星，开辟了一个十分重要的认识宇宙的窗口，使一门新兴的学科迅速发展起来。当今最先进的爱因斯坦X射线天文台、伦琴X射线天文卫星和钱德拉X射线天文台三项大型空间观测设备由于配置了X射线掠射望远镜，大幅度地提高了分辨率和灵敏度，以极其丰富的观测成果令世人瞩目。美国天文学家卡尔多·贾科尼由于对X射线天文学突出的贡献荣获2002年度诺贝尔物理学奖。γ射线波段的观测技术也有了长足的进展，康普顿γ射线天文台成为20世纪空间望远镜的代表作之一。它所携带的γ射线探测设备是当今最先进的，综合探测能力达到了最高峰，不仅使天文学进入了全波段观测研究的时代，还发现了诸如X射线脉冲双星、γ射线暴源这样特殊的天体，形成了新的研究领域。红外天文卫星、红外空间天文台、国际紫外探测者等等一系列探测红外辐射和紫外辐射的空间探测器也获得了许多令人震惊的新发现。

自古以来，人们就幻想着飞上太空亲眼看看那里的奥秘。从1957年前苏联的第一颗人造卫星上天到今天，太空中的人造卫星、航天飞机、宇宙飞船和空间站已构成空间一族。天文学空间探测已成为空间科学的主旋律。从1969年开始，美国"阿波罗"号宇宙飞船先后6次共有12

名宇航员登上了月球,在月面累计停留了300多个小时,月面探测80小时,行程90.6千米,带回了月球土壤和岩石样品381千克,使我们对月球的认识产生了巨大的飞跃。科学家们又在策划如何利用月球和改造月球的宏伟计划。月球作为人类进行科学研究、开采矿藏、旅游,甚至移民基地的前景展现在我们的面前。我国的空间技术已经步入国际先进行列,并已开始实施登月计划的历程。

行星的空间探测使人类对它们的认识得到了一次巨大飞跃。除了最远、最小的冥王星之外,已经有不同系列的宇宙飞船从各大行星的近处飞过,或成为围绕行星的卫星对行星进行近距离的拍摄和探测,甚至将探测器送上了火星和金星的表面,进行实地考察和取样实验。在九大行星当中,火星是与地球最相似的行星,关于火星上有没有生命这个问题已经困惑了人类几个世纪。因此对火星的探测成为所有行星探测中的重中之重。金星的浓密大气和温室效应;木星的大红斑和它自身具有的比较强的辐射;土星的美丽光环和众多的卫星:这些一直都是天文学家关注的焦点。对于离地球比较远,又比较暗的天王星、海王星和冥王星,地面上的大型望远镜很难看清楚它们及其卫星的细节。空间探测弥补了这个缺陷。在21世纪中将有更多的宇宙飞船探测行星,把宇航员送上火星亲自作科学考察的宏伟理想也可能在20~30年内付诸实现。

二、现代天文学的研究对象和研究领域

天文学的研究对象是宇宙中的所有天体,包括宇宙本身。研究对象包括三大层次,即行星层次、恒星层次和星系层次。所有这些层次的总和即是宇宙。这些层次尺度相差19个数量级,表1给出以光年为单位的这些数据。

现代天文学研究的热门领域或课题自然属于上述三个层次中的天体以及宇宙本身。太阳系行星的研究是个很古老的课题,但是20世纪对行星的空间探测使行星的研究成为最富挑战性的课题。地球上生机

表 1　天体和宇宙的尺度

地球直径	1.3×10^{-9}光年
太阳直径	1.47×10^{-7}光年
太阳系范围	1.2×10^{-3}光年
最近的恒星距离	4.3 光年
银河系的尺度	10^5 光年(十万光年)
较近的星系的距离	10^6 光年(百万光年)
富星系团的尺度	10^7 光年(千万光年)
可测宇宙	1.5×10^{10}光年(150 亿光年)

勃勃、五彩缤纷的生命世界使人们期望在地球之外、太阳系之外寻找生命和与人类智能相当甚至超越人类的生物。寻找地球之外的生命首先寄希望于太阳系内的行星的探测,然而,探测结果却令人失望,尽管火星的条件与地球如此相像,但并没有找到火星上存在生命的迹象。天文学家转向搜索太阳系之外的行星,特别是与地球类似的行星系统。与此同时,搜寻地外文明发来的电波和主动与外星人联系的宇宙通讯等科学研究都在紧锣密鼓地进行着。自 20 世纪 50 年代,人类开始挑战宇宙航行以来,地外生命的探索始终是空间探测的一项重要内容。人们正在期待有突破性的进展。

太阳虽然是银河系中数以千亿计的恒星中普通的一员,但它是离我们最近的一颗恒星,是惟一将它的面容展现给我们、使我们能够加以详细研究的恒星。太阳也是对地球和人类影响最大的恒星,太阳上发生的种种活动现象,诸如黑子、日珥、耀斑等都对地球有巨大的影响。太阳是一个炽热的等离子体气体球,瑞典天文学家阿尔文为了研究太阳上多种多样的磁场变化过程,发展了磁流体力学理论,导致一门新学科的诞生。他也因此荣获了 1970 年的诺贝尔物理学奖。

宇宙中数不胜数的恒星,它们的化学组成大同小异,质量的差别也不太大,但大小和密度却相差十分悬殊。恒星与宇宙中的万物一样都有一个诞生、成长、衰老和死亡的演化过程。从星云形成的原始恒星,到主序星,发展到不稳定的红巨星、变星,一直到核燃料耗尽后演变为致密的白矮星、中子星和黑洞,经历了几千万年、几亿年,甚至百亿年的岁月。

钱德拉塞卡首创的白矮星理论以及他与当时最著名的天文学家的一场关于白矮星质量上限的辩论和他荣获诺贝尔物理学奖的历程令人回味无穷。

恒星的能源、元素合成和太阳中微子之谜是现代天文学研究领域的三个热点课题,这些研究的理论基础是现代物理学最为活跃的核物理和粒子物理学。各类天体中具有各种各样但不尽相同的元素及同位素。美国天文学家福勒解决了恒星元素合成问题,使他荣获 1983 年度的诺贝尔物理学奖。太阳和恒星能量来源的研究始于 20 世纪 30 年代,美国物理学家贝特首先提出太阳核心的氢核聚变是太阳光和热的源泉。这为后来的研究所证实。大质量恒星的能源取自多个热核反应过程。太阳和恒星上的热核反应过程产生了多种元素,也产生大量的中微子。美国的雷蒙德·戴维斯和日本的小柴昌俊因探测太阳中微子的开创性成就荣获了 2002 年诺贝尔物理学奖。

脉冲星的发现曾轰动世界。1967 年英国天文学家休伊什教授和他的研究生乔斯林·贝尔女士一起发现了脉冲星,找到了物理学家预言了 30 多年的中子星。中子星的质量和太阳相当,但半径只有 10 千米,成为一种具有超高密、超高压、超强磁场和超强辐射的天体。脉冲星的发现,不仅为天文学开辟了一个新的领域,而且对现代物理学的发展也产生了重大影响,导致了致密物质物理学的诞生。1974 年,美国天文学家泰勒和他的学生赫尔斯发现射电脉冲双星,并且确认了这个在轨道运动中的中子星的引力辐射的存在。爱因斯坦预言的引力辐射终于在半个多世纪以后得到了第一例证据。休伊什和泰勒、赫尔斯因他们的发现分别荣获 1974 年和 1993 年诺贝尔物理学奖。在天文学中仅有脉冲星的研究这一项目获得两次诺贝尔奖。

黑洞和类星体是两种不同性质的天体,但它们都是在宇宙演化研究中有举足轻重地位的天体。黑洞是理论研究的产物,可以说是理论家计算出来的。黑洞作为大质量恒星演化的归宿,属于恒星层次的天体,但是也有星系层次的黑洞。当今的黑洞研究已越来越多地与天体物理前沿领域众多的热点课题相关联,已经到了采用各种观测手段搜寻黑洞的

阶段。黑洞研究的兴起源于爱因斯坦的广义相对论，而霍金把量子理论引入到黑洞研究中导致观念上的重大突破，黑洞的边界不再是密不可透，黑洞还能辐射能量和损失质量。类星体是迄今为止观测到的最明亮、最遥远也是最古老的天体。类星体并不是恒星，而可能是遥远星系的核心部分。它的能量来源、特大红移和“超光速”现象成为当代物理学和宇宙论争论的焦点。黑洞和类星体的重要性绝不亚于白矮星和中子星。虽然黑洞理论已很详尽，但是目前尚未找到黑洞存在的确切证据，类星体虽已发现过万，但它究竟是什么天体也还没有完全弄清楚，所以它们仍然是宇宙中两种尚未彻底揭开其奥秘的天体。

银河系和河外星系是星系层次的天体。由于太阳系在银河系中，我们只能从银河系的内部观测银河系，这与观测任何其他天体都是不一样的。因此，弄清楚银河系的形状和结构很不容易，真所谓“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。最先给出银河系结构的是英国天文学家赫歇尔，他十年如一日地观测了十几万颗恒星，被誉为“恒星之父”。在详细研究恒星的距离和空间分布以后，他得出银河系的大致图像，把人们的目光从太阳系延伸到广阔的银河系，成为人类认识宇宙历史上一个重要的里程碑。银河系是由上千亿颗恒星、众多的星团、星云和星际介质，以及隐藏着的大量暗物质组成的。我们对构成银河系的天体的研究较之其他星系细致得多，深入得多。银河系成为其他河外星系，乃至整个宇宙的一个样板。目前，银河系中心的性质仍是天文学家关注的焦点。银心是恒星较密集的部分，并且越靠近中心的部分就越密集。银心附近充满了大量的尘埃，挡住了可见光的传播，使光学望远镜无法窥视银河系中心的秘密。但是射电、红外和 X 射线波段的辐射却可以通行无阻，成为探索银河系中心秘密的重要手段。初步查明，银河系中心并不是简单的恒星密集，很可能存在一个质量很大的黑洞。

在银河系以外，还有许许多多与银河系类似的庞大天体系统，它们被叫做河外星系。20 世纪 20 年代，被誉为“星系之父”的美国天文学家哈勃确认了仙女座大星云是银河系之外的比银河系还大的天体系统，从此人们的目光又从银河系扩展到广阔无垠的宇宙空间，实现了又一次认

识上的飞跃。哈勃不仅发现了河外星系,还发现宇宙正在膨胀的证据,为确立现代流行的热大爆炸宇宙模型提供了依据。目前已观测到最远的河外星系距离达150亿光年。天文学研究的范围扩展到以百亿光年为尺度的广阔空间,并可追溯到百亿年以前发生的事件,成为现代宇宙学的重要支柱。河外星系按其特性被分为正常星系和活动星系或特殊星系两大类。活动星系和活动星系核是当今最活跃的研究领域。射电星系、赛弗特星系、致密星系、爆发星系和类星体都是属于活动星系。河外星系也聚集成大大小小的集团,有双重星系、多重星系以至于由成百上千个星系组成的星系团。星系团中各个成员之间是由引力相互联系着。星系、星系团以及这种宇宙中的大尺度结构的形成和演化也是宇宙学研究中正在探索着的热点课题。

生活在宇宙中的人们都想知道宇宙是什么,宇宙是如何形成和演化的等一系列问题的答案。从远古时代到今天,人们一直在探讨这些问题。建立在科学基础上的现代宇宙学是20世纪科技发达的时代才开始的。宇宙学是研究整个宇宙演化的学科,不仅是天文学家的重要研究领域,也是物理学家大显身手的学术领域。爱因斯坦率先提出了静态宇宙模型,不到12年就由于哈勃定律的问世而被抛弃,随之诞生了一门新的科学——现代宇宙学。当今流行的大爆炸宇宙学由于获得越来越多观测事实的支持而占了上风,其中宇宙背景微波辐射的发现是最重要的支持。1963年初,彭齐亚斯和威尔逊利用射电望远镜进行射电源的绝对测量时偶然地发现了宇宙背景的3.5 K的辐射。这种辐射被确认是宇宙大爆炸时的辐射残余,恰好证实了宇宙大爆炸理论的预言。这一发现被公认为20世纪天文学的一项重大成就。他们也因此获得了1978年度的诺贝尔物理学奖。

三、撰写《现代天文学十五讲》的一些想法

应《名家通识讲座书系》编委会的邀请编写这本教材,我们选定现代天文学研究中的十四项最为激动人心的成就加上天文学发展历程的回

顾，共十五讲。恰好，从 2000 年到 2002 年，我们在北京大学开设“现代天文学与诺贝尔奖”全校性通选课的教学实践为编写这本教材作了准备，也找到了编写体现通识素质教育的《现代天文学》教材的感觉。同学们的反映、意见、体会对我们有很大的启发和帮助。

通过三次讲授的实践，深感编写出一本适合大学本科生的天文学方面的通选课程教材是一件很困难的事。从 2000 年到 2002 年的三年中，每次选修“现代天文学与诺贝尔奖”的学生都达到 200 多名，超过了预定的人数，这说明这门课程深受同学的欢迎。同学来自十几个系科，文科和理科的学生数参半，主要是低年级的同学，也有少数高年级学生。除少数天文爱好者外，绝大多数同学都是初次接触天文学，缺乏必要的天文知识。文、理科学生对于理解现代天文学知识和新成就所具备的物理学基础差别也相当大。这对于教材的编写和讲授都带来了很大的困难。

《现代天文学十五讲》要让广大非天文系科的同学接受，首先要让他们读得懂、喜欢读，必须以通俗的语言来讲解深奥的科学问题；同时必须要让同学在学习以后有实实在在的收获，充分发挥“现代天文学”的科学理性和人文价值。

十五讲的每讲大都包括这样三个方面的内容：一是比较系统地介绍现代天文学前沿领域的新成果、新趋势、新信息，虽然力求深入浅出，但仍有一定的难度，作为教学要求定位于“初步了解”；二是要介绍与各讲有关的天文基础知识，这不仅为理解天文学前沿成果的科学内容所必须，也是同学应该掌握得比较好的内容；三是对现代天文学各个突出成就的发展背景和作出杰出贡献的天文学大师的奋斗精神、治学态度、思维方法和高尚的情操加以介绍，为同学提供学习的榜样。

我们很同意北大中文系一年级屠建达同学(2000 级)的意见，他在考试答卷上写下了对课程的意见和评说，他指出：“文、理科的划分是学科细化的必需，也是人文与科学隔离的开始。如今有科学而无科学精神，有感性而缺乏理性的无知是教育中的普遍现象。现代天文学学科的庞杂体系，艰深的理论模型，构成了天文学走入民间，发挥其科学理性价值的障碍。而同时，即使是天文学研究者本身也往往失去了其对科学精神

的领悟，丧失了其对科学追求的目标与意义。正是从这个角度说，'现代天文学与诺贝尔奖'这门课才具有独特的意义，从科学方面，它介绍的是科学的基本概念，宣扬的是科学的理性，为天文爱好者和普通人提供了天文观测的门径，使得其能从这里开始走下去，真正地接触天文学；从人文方面来说，它注重的是天文学诺贝尔奖获得者的精神的挖掘，阐述了科学精神的内涵。而这一点，不仅适用于天文学领域，同样也适用于其他科学领域，甚至可以说是教育的所有领域，无论文科和理科，都可以从这一点中获益。"

对于"现代天文学与诺贝尔奖"课在人文方面的作用，几位选修课程学生的体会令我们坚定了撰写这本教材的信心。这也是我们在这本教材中刻意要介绍众多的天文学大师的原因。下面仅摘录几位同学在考卷中的评说。

电子学系二年级童霆同学(1999级)说："钱德拉塞卡在其年轻的时候就提出了白矮星理论及其质量上限。可以说，在他的身上汇聚了一个诺贝尔奖获得者应具备的绝大多数素质和修养。他善于接受新的物理学观念和成果，始终走在科学发展的前沿；他不盲目迷信和屈服于权威，具有追求真理的崇高理念；他不屈不挠，最终让权威折服。虽然他很年轻的时候就取得了如此大的成就，但在他以后的科学生涯中仍然保持着科学的青春，勤勤恳恳，不懈奋斗。看钱德拉塞卡的一生，不计虚名，不是为得奖而作科学，而是为科学而得奖，为科学而献身。在他七十高龄时获奖，不仅是对其伟大成果的肯定，更是对其崇高科学精神的彰扬。我们决不能为获奖而科学，而应该勤恳踏实地拓宽自己所在各个学科的理论基础和学术素质。一个真正的科学家，应该记住'科学'才是自己惟一的追求，待到水到渠成时，自然会得到诺贝尔奖的垂青，而只有拥有了一大批这样的科学家，我们才能建设起一个用科学武装起来的复兴的中华。"

俄语系一年级毕维伟同学(2000级)说："钱德拉塞卡与爱丁顿关于白矮星质量上限的争论表明，天文学的研究不存在辈份的区别，青出于蓝而胜于蓝；天文学界也不会有永远的权威，没有终极的真理，任何一个

理论都要经受时间的考验,任何一个天文学家都不能放弃对真理的探索而固步自封。星空无止境,宇宙无止境,探索也必然无止境。还值得一提的是,钱德拉塞卡与爱丁顿并没有因学术上的争论而成为仇敌,他们反而长久地维持了朋友关系,伟大天文学家的虚怀若谷、宽广胸襟由此可见一斑。天文学的研究永远欢迎争论和革新,但争论永远都是为了人类天文学共同的进步。"

数学系二年级杨光同学(1999 级)说:"学了这门课,接触到了众多的天文学大师,但其中最让我感动的是贝尔女士。这是一个并没有把自己的名字刻入诺贝尔奖得主史册的人,但她的名字被刻入了每一个人的心里。没有谁能否认她在发现脉冲星上的贡献,尽管最后获得诺贝尔奖的只有她的老师休伊什。有人问,我们该向贝尔女士学习什么,答案自然有好多种,所谓勤勉,所谓好学,所谓持之以恒,所谓改革创新。就算我们把她的这一切都学会了,我们也最多只能算是对了一半儿。我们该问自己,如果与诺贝尔奖如此不公正地错过而毫不抱怨,甚至站出来替自己的老师打抱不平,你能做到吗?其实每一个致力于科学研究的人都该这样问自己,看一看自己到底因为什么而献身科学。科学是属于全人类的,我们本不该在意一项成就被署上谁的名字,我们应该坦然地与全人类一起向前发展。判断一个人的真正价值并不在于他拥有多少荣誉,而在于他曾放弃过多少荣誉。"

法学院一年级黄文同学(2000 级)写道:"彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙背景辐射而获得诺贝尔奖是偶然中的必然。他们对天文观测精益求精的态度是他们取得成果的主观原因,观测设备的适宜性又为他们的成功铺平了道路。他们的获奖是无可辩驳的。同时,从这一天文项目的获奖,我们也能看出在天文学的发展道路上,一代又一代天文学家付出的努力,他们中间仅有几个能获得诺贝尔奖,但每一个成功无疑都凝聚着无数未获奖者默默无闻的贡献,他们同样值得我们学习。"

化学学院二年级甘霖同学(1999 级)说:"任何一次诺贝尔奖的获得者都是社会、经济、个人素质、机遇等众多因素的综合结果。而其中最为可贵,也是作为科学家能够较好把握和控制的就是自身的科学素质。赫

尔斯和泰勒从发现40颗脉冲星到发现第一个脉冲双星，继而验证引力波的存在，都是敏锐的观察力、坚忍不拔的精神、不怕困难的勇气、敢于面对失败的决心、勇于挑战新问题、尖端问题的勇气等良好的科学素质在起关键作用。"

医学院一年级乌维宁(2000级)同学说:"阿尔文创立了磁流体力学而获得诺贝尔奖。他提出阿尔文波的时候，没有人认可。但他坚信自己的研究结果，不被别人的观点所左右，不断为了自己的理论努力，直到探测到阿尔文波的一刻，他胜利了。从不被认同到获诺贝尔奖，这反差是很大的，过程是艰辛的。从阿尔文获奖，我可以学到很多：要勇于面对挑战，要敢于捍卫新鲜的理论，敢于挑战旧有的思想和模式并为之奋斗终生——为理想奋斗终生。"

北大同学的上述体会，当我们在2001年7月在台北举行的"第五届海峡两岸天文教育推广研讨会"上介绍时，受到台湾同行赞赏，认为这些学生的体会富含哲理，回味无穷。台北天文学会理事周联生先生来信说，"研讨会上，您的论文充满着人文气息，《观星人杂志》特别转载，让未与会的读者同感心灵的震撼。"

本教材的十五讲彼此之间有一定的关系，但基本上是各自独立、自成系统的。这将方便教师选择其中的一部分，或某讲中的某些章节作为课程的要求，而把其他内容作为同学的选读。要说明一点的是，虽然我们注意深入浅出地介绍当代最杰出的一批天文学研究成就，但要完美地实现还是有差距的，对同学的学习带来一定的困难。对于文科和理科的同学，低年级和高年级的同学感受可能是不一样的。从教学要求来说应定位于了解现代天文学的杰出成就和最新信息，掌握一些最基本的天文学基础知识。可以根据选课对象提出不同的要求。天文学研究主要依靠观测获取天体的信息，绚丽多彩的天体照片是一个天文知识宝库，也是一个艺术画廊。我们选择有代表性的天体照片共12个彩页。这组彩图和说明便于进行形象化的教学，可以做成PowerPoint文件，与前言部分结合起来讲授。本书彩色插页中除两幅极光照片外，所有照片都是由哈勃空间望远镜、人造卫星、空间探测器和地面大型望远镜拍摄的。书

中的一些插图引用或参考了香港大学物理系“宇宙本质”教材，特此致谢。

为了方便同学学习，特别是帮助文科同学克服天文学和物理学知识不足所带来的困难，在附录 1—7 中给出了与课程各讲有关的天文和物理名词的解释以及一些最基本的天文学知识、星表和天文学大事记。

《名家通识讲座书系》第一批
选目(52种)

*《西方哲学十五讲》 中国人民大学哲学系 张志伟
*《现代西方哲学十五讲》 复旦大学哲学系 张汝伦
*《哲学修养十五讲》 吉林大学哲学系 孙正聿
*《美学十五讲》 东南大学艺术系 凌继尧
*《宗教学基础十五讲》 清华大学哲学系 王晓朝
*《生物伦理十五讲》 北京大学生命科学学院 高崇明 张爱琴
《艺术哲学十五讲》 北京大学比较文学所 刘 东
《文化哲学十五讲》 黑龙江大学 衣俊卿
《科技哲学十五讲》 南京大学哲学系 林德宏

*《政治学十五讲》 北京大学政府管理学院 燕继荣
*《口才训练十五讲》 清华大学政治学系 孙海燕 刘伯奎
《社会学理论方法十五讲》 北京大学社会学系 王思斌
《公共管理十五讲》 北京大学政府管理学院 赵成根
《西方经济学十五讲》 中国人民大学经济学院 方福前
《比较教育十五讲》 北京师范大学教育系 王英杰

*《道教文化十五讲》 厦门大学宗教所 詹石窗
*《周易哲学与易文化十五讲》 清华大学思想文化所 廖名春
*《美国文化与社会十五讲》 北京大学国际关系学院 袁 明
《佛教文化十五讲》 中国佛教文化研究所 何 云
《中国文化史十五讲》 北京大学古籍研究中心 安平秋 杨忠 刘玉才
《儒家文化十五讲》 中国社会科学院哲学所 郑家栋

《文化研究基础十五讲》 北京大学比较文学所 戴锦华
《企业文化学十五讲》 武汉大学政治与行政学院 钟青林
《现代性与后现代性十五讲》 厦门大学哲学系 陈嘉明
《日本文化十五讲》 北京大学中文系 严绍璗

*《汉语和汉语研究十五讲》 北京大学中文系 陆俭明 沈 阳
《语言学常识十五讲》 北京大学中文系 沈 阳

*《唐诗宋词十五讲》 北京大学中文系 葛晓音
*《中国文学十五讲》 北京大学中文系 周先慎
*《中国现当代文学名篇十五讲》 复旦大学中文系 陈思和
*《西方文学十五讲》 清华大学中文系 徐葆耕
*《通俗文学十五讲》 苏州大学 范伯群 北京大学中文系 孔庆东
*《鲁迅作品十五讲》 北京大学中文系 钱理群
《红楼梦十五讲》 文化部艺术研究院 刘梦溪 冯其庸 周汝昌等
《当代外国文学名著十五讲》 吉林大学文学院 傅景川

*《西方美术史十五讲》 北京大学艺术系 丁 宁
*《戏剧艺术十五讲》 南京大学文学院 董 健 马俊山
*《音乐欣赏十五讲》 中国作家协会 肖复兴
《中国美术史十五讲》 中央美术学院 邵 彦
《影视艺术十五讲》 清华大学新闻传播学系 尹 鸿
《书法艺术十五讲》 北京大学中文系 王岳川

*《中国历史十五讲》 清华大学 张岂之
*《欧洲文明十五讲》 中国社会科学院欧洲研究所 陈乐民
《科学史十五讲》 上海交通大学文学院 江晓原
《清史十五讲》 中国人民大学清史研究所 张 研

*《文科物理十五讲》 东南大学物理系 吴宗汉
《思维科学十五讲》 武汉大学哲学系 张掌然
*《现代天文学十五讲》 北京大学物理学院 吴鑫基 温学诗

《青年心理健康十五讲》 清华大学教育研究所 樊富珉

《环境科学十五讲》 北京大学环境科学中心 张远航 邵 敏

《医学人文十五讲》 华夏出版社 王一方

《心理学十五讲》 西南师范大学心理系 黄希庭

(全套系列教材100种,其他48种选目正在策划运行中。其中,画*者为已出)

目　录

第一讲

天文学的发展

天文学是一门具有悠久历史的古老学科,可以追溯到5000余年前。在漫长的岁月里,人类积累了十分丰富的资料,但由于科学技术的落后、宗教势力压制和封建迷信盛行,天文学的发展非常缓慢。错误的托勒密"地心说"统治了1500年,正确的哥白尼"日心说"论著出版后便成为禁书,被禁锢了2个多世纪。到了牛顿应用力学定律研究行星的运动定律以后天文学才从单纯研究天体运行的状态,进入到理性认识天体运动规律阶段。19世纪中叶物理学的发展促进了致力于揭示天体物理本质的天体物理学新学科的产生。19世纪末20世纪初,物理学经历了从经典物理到现代物理过渡的发展阶段,天体物理学也从经典发展到现代天文学的阶段,天文学的发展速度越来越快。这一讲将分几部分介绍从远古到托勒密时代的古代天文学,从哥白尼到牛顿时代的近代天文学,从18、19世纪经典天体物理学到20世纪现代天文学。在天文学发展的漫长岁月中,在各个历史阶段都涌现出一批著名的天文学家和代表人物。他们的成就代表了当时天文学的发展水平。

一、古代天文学的发展

中国、埃及、印度、巴比伦、希腊和罗马等文明古国是世界上天文学发展最早的国家。这些文明古国对天文学的贡献都是巨大的，有其共同性，也各有特色。人类最古老的文字，如考古出土的中国殷墟的甲骨文和古巴比伦泥版书上的楔形文字，都曾记载了不少有关天文方面的内容。各民族观察天象的历史几乎和民族本身的历史一样长远。丰富的天象观测记录是世界各文明古国对天文学发展的重要贡献。天文观测方法、天球坐标系的创立、星座的划分以及历法等古代天文学的成就和精华都被现代天文学所继承和发展。

1. 中国辉煌的古代天文学

我国古代天文学的发展可以追溯到原始社会。到了春秋战国时期(公元前 770—前 222 年)开始有了比较系统的天文学观测记录。到了秦汉时期(公元前 221—公元 200 年)，形成了以历法和天象观测为主的体系。历法的制定和修改成为各个朝代的政府行为，有专职的天文官吏，有经费、有发展计划、有史书详细记载天文学的大事。

我国古代天文学的最重要成果是对星空、恒星、太阳、月亮、行星，以及众多天象进行观测，记录下非常丰富的观测资料。这些资料对现代天文学研究仍有重要的参考意义。因此，在本讲中仅重点介绍那些与现代天文学研究仍密切相关的观测成就。

星座

最早把星空中的数不清的星星划分为不同的星座是古代迦勒底人。我国虽然比他们晚，但也创造了自己的星座划分体系。我国称星座为星官，其中最重要的星官是三垣二十八宿。三垣是比较大的天区，二十八宿则是把黄道、赤道附近的星象划分为二十八个大小不等的部分。这一体系对天体位置的测量和形成优越的赤道坐标系起了非常重要的作用。为了测量天体位置的需要，在每一宿中选取一颗星作为定标星，称为“距



图 1-1 敦煌星图，绘制时间大约在公元 705—710 年

星”，当时确定距星的位置用的是天球赤道坐标系，这是我国独创的坐标系，也是现代天文学研究中应用最普遍的天球坐标系。图 1-1 为我国唐代古星图：敦煌星图（局部）。该图现存于英国伦敦博物馆。

太阳黑子和日食

太阳是离我们最近的一颗恒星，太阳物理学是现代天文学经久不衰的研究学科。太阳黑子是丰富多彩的太阳活动当中最重要的现象之一。早在公元前 140 年，我国就有关于太阳黑子的观测记录。之后，对太阳黑子的监测成为古代天文学家经常性的工作。他们积累了大量资料，对太阳黑子这一活动现象作了确切的描述。如黑子以及黑子群的出现的时间、大小和位置都说得一清二楚。欧洲关于太阳黑子的最早记录是在公元 807 年，比中国晚了近千年。遗憾的是，我们并没有从这丰富的资料中发现太阳活动周期为 11 年这一重要的规律。

古代日食的观测记录就更多了。我国古书《书经》详细地记录了一次发生在约 4000 年前的夏代仲康元年的日食。从 2700 多年前的春秋战国时期起，古书记载的日食观测记录越来越多，到元朝末年的 1368 年已有 650 次。

彗星、流星和陨星

我国关于彗星的观测记录也特别丰富。最著名的哈雷彗星是英国天文学家哈雷于 1682 年观测到的，考察了以前的彗星记录，发现它的轨道周期是 75～76 年。经考证，我国在公元前 613 年的古书《春秋》记载的一次彗星恰好是哈雷彗星的最早记录。之后，我国古籍对这颗彗星的记录多达 31 次。长沙马王堆三号墓出土的帛书绘有 29 幅彗星图像，形态各异，但是都有明显的彗头和彗尾，这是战国时代的记录，和当代的观测结果很符合(见图 1-2)。我国古代关于彗星的记录有 500 多次。现代天文学家在研究彗星的周期等问题时还在利用这些古代观测资料。

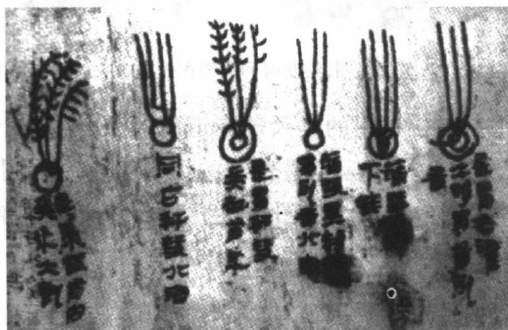


图 1-2 长沙马王堆三号墓出土的绘有彗星形象的帛书(部分)

关于流星、流星雨、陨星的观测记录不仅多而且十分精彩。公元 461 年我国《宋书·天文志》记载的一次天琴座流星雨是这样描写的："有流星数千万，或长或短，或大或小，并西行，至晚而止。"而对一次英仙座的流星雨，《新唐书·天文志》中写到，"有星西北流，或如瓮，或如斗，贯北极，小者不可胜数，天星尽摇，至曙乃止。"我国古代记录的流星雨事件多达 180 次。

新星和超新星

宇宙中最为壮观和激烈的天象莫过于天体的爆炸或碰撞，如超新星爆发或星系碰撞。在没有望远镜的年代，只能用肉眼观测，当然只能局限于银河系内的现象。自商代到 17 世纪末，我国古籍记载的包括新星

和超新星在内的“客星”约有 90 颗，其中 12 颗是超新星。最著名的是发生在 1054 年的“客星”。宋朝的《宋会要》记载表明，这颗超新星在白天也能看见，像金星一样的芒角四射。经国际天文学界证认，当今被誉为“全波段天文学实验室”的蟹状星云，就是我国古籍记载的 1054 年这颗“客星”的遗迹。

国家重点项目“夏商周断代工程”与古天文研究

20 世纪 90 年代，研究我国历史的“夏商周断代工程”成为国家的重点研究项目。我国具有悠久的历史，但是有确切年代记录的是在西周共和元年，即公元前 841 年。在这之前的夏、商以及西周大部分时间都没有确切的记载。“断代工程”的目的就是要弄清夏商周各朝代的年代。这是一项集历史学、考古学、文字学和天文学等众多学科于一身的综合性课题，但是只有天文学才能够推算出某些天文现象发生的绝对年代。

我国古籍书中有很多这些天文现象的观测记录被利用来考证“武王伐纣”的确切年代。例如已故紫金山天文台台长张钰哲提出，“如果武王伐纣时的一次彗星记录是哈雷彗星的话，那么可计算出那时是公元前 1057～1056 年”。五星联珠现象是指五颗行星(金、木、水、火、土)集聚在 30 度的范围内，计算得出从公元前 2000 年到公元后 2000 年的四千年中发生过 107 次。有人计算“殷纣之时，五星聚于房”的天象可能是发生在公元前 1576 年 11 月至 12 月间。西周时期发生的一次日食记载为“懿王元年再旦于郑”，再旦被认为是发生在凌晨的日食，即黎明时天黑了，又亮了。郑的位置在现在的陕西省。已有几位天文学家根据这一事例推算懿王元年的确切年份。

古代天文仪器

我国古代很早以前就有了多种多样的天文仪器，其中最有名的是浑仪。“浑”字的意思是圆球，浑仪是由代表多个坐标系的大圆环所组成，主体部分是一个大圆球。它可以测量天体的赤道坐标。浑仪历史悠久，它的发明大约在公元前 4 世纪至公元前 1 世纪之间。随着浑仪的发展，增加测量天体黄道坐标和白道坐标的功能，最完善的要数唐太宗贞观初

年(公元 630 年前后)李淳风研制的浑仪。但是浑仪功能的增加,代表不同的坐标系的大圆环也增多,导致遮挡的天区增加,给观测带来很大的损失。元朝初期天文学家郭守敬于 1276 年把结构复杂的浑仪进行简化革新成为简仪。简仪中的赤道经纬仪与现代望远镜中广泛应用的赤道装置的基本结构相同,只对北天极天区附近有些遮挡。我国古代观测最先采用的赤道坐标系,已成为现代天文学研究中应用最普遍的天球坐标系。当代英国著名学者李约瑟很感叹地评价说:“现代国际通用的是中国古代的赤道坐标系,而不是希腊古代的黄道坐标系。”赤道坐标系的优点是坐标值不随时间变化,也不受观测点地理位置的影响,可惟一确定恒星在天球上的位置。现在陈列在南京紫金山天文台的浑仪和简仪是明正统二年(1437 年)仿制的(图 1-3)。

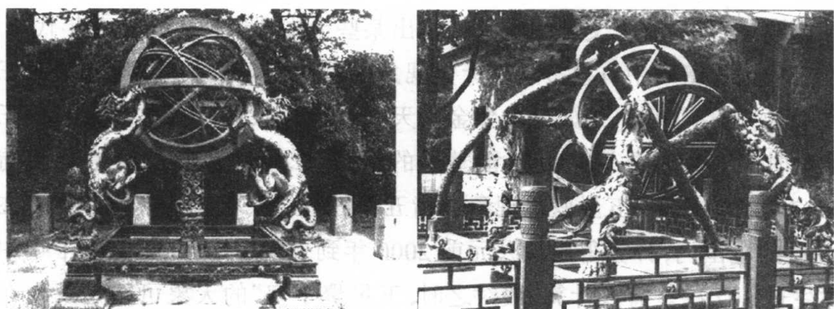


图 1-3 陈列在南京紫金山天文台的浑仪(左)和简仪(右)(1437 年仿制)

我国古代出现一大批成就卓著的天文学家,主要在历法、天文仪器研制和天文实测方面。如张衡(78—139)、祖冲之(429—500)、一行(683—727)、沈括(1031—1095)、郭守敬(1231—1316)等。中国古代在天文理论方面的研究比较薄弱,这也是后来中国天文学渐渐落后的原因之一。

2. 古希腊天文学和托勒密的地心说

古希腊天文学很发达,特别是对于宇宙的结构早就有了比较理性的研究。在托勒密以前的八百年间天文学先后形成四大学派,曾提出以地

球为中心的同心球体系、本轮-均轮说和太阳为中心的日心地动说三种理论。对世界天文学发展影响最大的应是古希腊著名天文学家托勒密于公元 140 年提出的改良版地心说。

在那时，对太阳系中的几个行星的观测已经积累了相当多的资料，人们发现行星在天球上的群星中游动，有时顺行，有时逆行，有时还会停留不动。图 1-4 的右侧是火星在天球上的视运动的轨迹，明显看出有逆行现象。按照现代天文学的认识，火星的逆行现象是由于地球和火星都在绕太阳运转，地球的轨道周期 365 天，而火星的轨道周期 687 天，在地球上看火星在天球上的视运动就出现了顺行、逆行和留的现象。行星的逆行是困扰那个时期天文学家的一个难题，任何理论或模型都必须能解释行星视运动的逆行、顺行和留现象，还必须能解释太阳和月亮在天球上视运动的不均匀性。

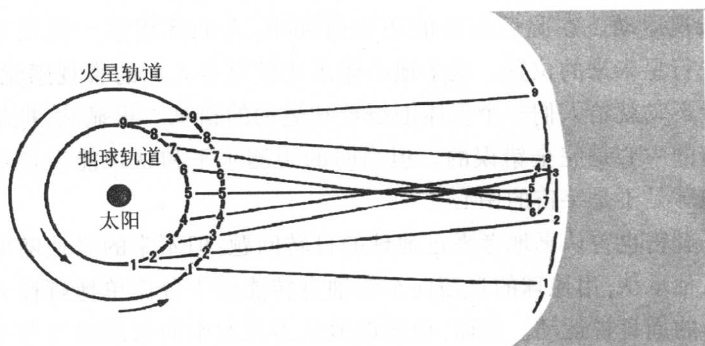


图 1-4　火星逆行的解释：地球的轨道周期为 365 天，而火星的轨道周期为 687 天，在地球上看火星在天球上的视运动就出现了顺行和逆行的情况。

托勒密地心说的要点是：地球位于宇宙中央静止不动，行星、月亮、太阳和恒星每天绕地球自东向西转一周，如图 1-5 所示。离地球最近的第一圈轨道上是月亮，然后依次为水星、金星、太阳、火星、木星和土星。再外的一层是恒星天。太阳、月亮和恒星天直接绕地球运动。为了解释行星有顺行、逆行和留的现象，他提出行星有两个轨道运动，一个轨道是行星绕一个名叫本轮的小圆轨道运动，另一个轨道是本轮的中心围绕地

球运转的大圆轨道，称之为均轮。这个理论所预测的行星位置，和实际位置的误差在几度之内。

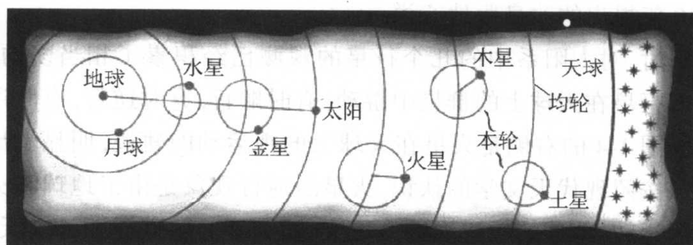


图 1-5　托勒密的地心说示意图

托勒密的地心体系不是一个定性的、描述性的体系，而是一个定量的、可以预报行星未来位置的体系。在当时较低的观测精度的条件下，用这一体系所作的理论推算大体上能与观测结果相吻合，可以解释行星的复杂视运动。在此后很长的历史时期中，人们都用这一模型来预报日、月、行星未来的位置。这个地心体系比较符合人们的直观感觉，天体的周日运动就给人们一个天体围绕地球运动的错觉。很显然，把地球看成宇宙的中心是完全错误的。但当时的观测水平和认识能力还不能判别出地球是不是宇宙的中心。

托勒密也曾认真地考虑过地球的自转问题，但不幸的是他随即又否定了。他承认，用地球的自西向东绕轴自转能够十分简单地解释天体东升西落的周日视运动。然而，他错误地认为天空中的云彩和飞鸟不可能跟随地球一起自转。他认为，当地球在不停地自西向东自转时，地球因自转而造成的表面运动速度远远超过云彩和飞鸟的速度，因此云彩和飞鸟只能有自东向西的运动。可是，他看到的却是云彩和飞鸟可以轻易地在空中自西向东飞行。因此他断言，地球并不存在自转。托勒密不懂得地球的大气、浮云和飞鸟都是在随地球一起自转着的。

托勒密研究天文学的方法在当时是先进的，也是科学的。他从研究观测现象出发，建立天体运动的几何图像(理论模型)，使之能够解释观测到的复杂现象，预知天体未来的视位置，并用新的观测资料来加以检验，这些至今仍不失为一种好的科学方法。在 1800 多年前，托勒密就有

这样的成就，不愧为一位杰出的天文学家。

但是，托勒密的地心说在科学上是错误的，在天文界统治了约1500年，阻碍了天文学的发展。其实，对科学起阻碍作用的并不是托勒密地心体系本身，而是将它奉为钦定理论的基督教教会势力。实践是检验真理的标准，判断地心说是否是谬误，只能由天文观测来确定。直到中世纪末期，天文观测精度的提高才有可能发现托勒密地心体系所推算的日、月和行星的位置存在偏差。从学科的发展来说，地心说至此才到了被彻底推翻的时代。

二、近代天文学的发展

近代天文学以波兰天文学家哥白尼在16世纪30年代后期建立的日心体系为起点，哥白尼学说成为近代天文学的基石，使天文学首先跨入了近代科学的大门。哥白尼日心说在学术上彻底打败地心说并得以确立和发展的过程中，精于天文观测的天文学大师第谷、创立行星运动三定律的开普勒和发明天文望远镜的伽利略起了十分重要的作用。行星运动的三条定律成为经典天文学的奠基石。英国物理学家牛顿提出的万有引力定律则在理论上完美地解决了行星乃至所有天体运动的规律。牛顿的引力理论无孔不入地渗透到天文学研究的各个领域和课题中，形成了一门天体力学新学科，这是18世纪和19世纪中叶天文学最辉煌的成就。

1. 哥白尼和日心说

从托勒密到哥白尼经过了约1500年，在这很长的时间间隔中，天文学缓慢地发展着。实际上，古希腊天文学家早就提出过日心说。古希腊学者菲洛劳斯在公元前5世纪就提出：地球并不是宇宙的中心，而是不停地在绕“中央火”转动。虽然这“中央火”并不是指太阳，但至少表明地球是运动的思想由来已久。甚至有的学者正确地提出地球每天绕轴自转一周，而且又每年绕太阳公转一周的看法。但是，这些正确的看法很



图 1-6　波兰天文学家哥白尼

少有人赞同。直到16世纪，伟大的天文学家哥白尼提出日心说，才把地心说这一错误的宇宙观纠正过来。

哥白尼，1473年诞生在波兰维斯瓦河畔的托伦城。他年轻时就热爱天文学，但是他的舅父坚持让他从事宗教工作。1497年他到意大利学习教会法规期间，学习了数学和天文学，阅读了大量古希腊天文著作，对托勒密的学说体系更是潜心研究。

1506年，哥白尼从意大利回到波兰以后就在教堂工作。他把大部分精力都用在天文学研究上。他在教堂的高楼顶上的平台建起了自己的天文台，经常整夜地在那里观测星星。大约在1502～1514年间，哥白尼在《关于天体运动假说的要释》手稿中提出了太阳居中、行星和地球都绕着太阳转动的日心体系(图1-7)。但这仅仅是一个假说，缺乏令人信服的证据，也不能预测日、月、行星位置。哥白

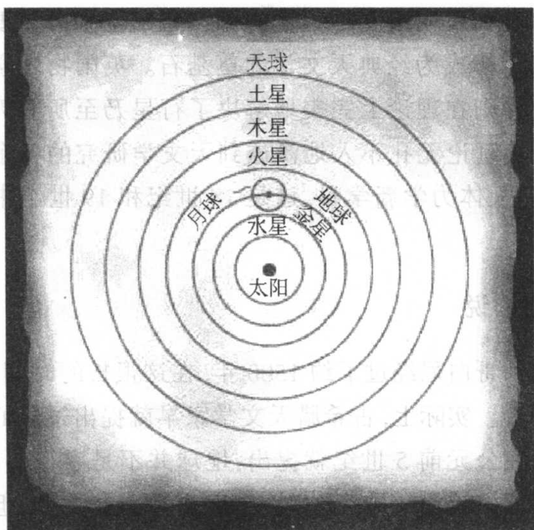


图 1-7　哥白尼的日心说示意图

尼继续研究，花费了近 40 年的心血，到了 16 世纪 30 年代后期，终于完成了他的科学巨著《天体运行论》。在书中，他描绘出了一幅宇宙总结构的示意图，中心为静止不动的太阳；最外层天球为恒星天，也安然不动；在恒星天之内的天球按土星(30 年绕太阳转一周)、木星(12 年绕太阳转一周)、火星(2 年绕太阳转一周)、携带着月球的地球(1 年绕太阳转一周，月球绕地球每月转一周)、金星(9 个月绕太阳转一周)、水星(80 天绕太阳转一周)分为六层。这一宇宙结构明确地把地球看成一颗普通的行星，正确地描述了 6 个行星绕太阳的轨道运动。

对于恒星和太阳的东升西落现象，哥白尼以“我们离开港口向前远航，陆地和城市悄悄退向后方”这样通俗的比喻来说明地球自转所造成的恒星、太阳、行星等各种天体的东升西落现象。

哥白尼的日心体系是一个相当严谨的理论，简单而精彩。他运用数学工具对天体的视运动作了定量探讨，成功地解释了行星的逆行现象，可以预测这些天体在未来某时刻的视位置，可以与以后的天文观测数据进行比较。然而他的著作迟迟不能发表，直至 1543 年 5 月 24 日在他生命的最后弥留时刻，才看到自己花费了毕生精力写成的《天体运行论》出版了。

虽然他把太阳看做宇宙的中心也是不对的，他的模型对行星运动的预测也不太准，但在地心说根深蒂固的那个时代，哥白尼的日心说无疑是对传统的错误观念的一场伟大的革命。哥白尼的日心学说导致了人类认识宇宙的一次巨大飞跃。哥白尼的日心体系奠定了近代天文学的基石，使天文学首先跨入了近代科学的大门。因此，哥白尼堪称近代天文学的奠基人。

2. 第谷、开普勒和伽利略

哥白尼提出的日心说被教会势力视为异端邪说，《天体运行论》被定为禁书长达两个世纪之久。教会对支持日心说的学者横加迫害，严重地阻碍了日心说的传播和发展。生于 1548 年的意大利科学家布鲁诺因支持、宣扬并发展了哥白尼的日心学说，被罗马教会囚禁 8 年以后判以残

酷的火刑，活活地烧死。日心说的发展缓慢还有一个原因是当时的天文学观测精度还不够高，根据日心说理论预测天体视运动的准确性和地心说差不多。特别是，日心说所预言的恒星周年视差现象未能在观测上得到验证，更使一些人产生了怀疑。因此，在学术上并没有完全打败地心说。哥白尼日心说在学术上彻底打败地心说并得以确立和发展的过程历经艰辛曲折。在这一过程中，精于天文观测的天文学大师第谷、创立行星运动三定律的开普勒和发明天文望远镜的伽利略起了十分重要的作用。

第谷



图 1-8　丹麦天文学家第谷

第谷是第一位对日心说的确立作出重大贡献的学者，有趣的是他本人却并不赞成这一宇宙体系。第谷 1546 年生于北欧丹麦一个贵族家庭中。进入哥本哈根大学后首次接触到天文学就爱上了。之后，他对天象的观测特别有兴趣，如进行日食、土星与木星相合等天象的观测，并均有所发现。1572 年他发现仙后座的一颗新星，观测得到从出现到消失整个过程的光变曲线。这颗新星后来被称为“第谷新星”，实际上是银河系中一颗十分罕见的超新星。第谷修建了属于自己的天文观测台，装备了自己设计的十多种天文仪器，还聘请了一批训练有素的助手。

第谷对恒星和行星进行了长期的观测，积累了大量资料。编制出版了一部列有 777 颗恒星坐标的星表。其观测精度在望远镜问世以前是首屈一指的，所测天体位置的误差已小于 2′，几乎达到肉眼观测所能获得的精度极限，远比古希腊的星表精确。第谷把他积累了 20 年的有关行星的观测资料交给了他的助手开普勒，为开普勒建立行星运动三定律准备了条件。

开普勒

开普勒1571年生于德国。进入蒂宾根大学后就对天文学产生了浓厚的兴趣，并且成为哥白尼学说的忠实维护者。1596年，他出版了《宇宙的神秘》一书，引起了当时著名天文学家第谷的注意，第谷因而邀请开普勒到布拉格天文台做他的助手。1601年，第谷逝世，开普勒接替了第谷的台长职务。从此以后，他一直致力于天文学研究，直至1630年逝世。



图1-9　德国天文学家开普勒

开普勒一生中最辉煌的成就是他发现了行星运动三定律。开普勒对第谷留下的极其丰富的行星视运动的观测资料进行了反复的研究。他先是按照传统的观念，认为行星是在围绕太阳作匀速圆周运动。但是，无论他用什么方法计算，都与第谷的观测结果不符，火星的黄经误差有8′之多。第谷的观测是完全值得信赖的，于是他想到，行星可能不是在作匀速圆周运动的，1609年他终于发现了"火星是沿椭圆轨道绕太阳运行，太阳处于椭圆的一个焦点上"（图1-10）这条重要的行星运动第一定律。开普勒说："就凭这8′差异，引起了天文学的全部革新！"。不久开普勒又发现，尽管火星在近日点附近时运行得快一些，在远日点附近时运行得慢一

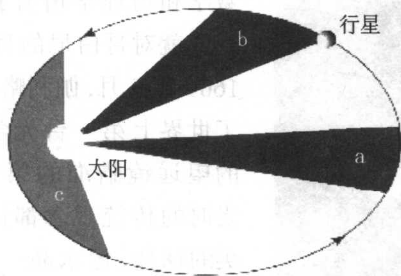


图1-10　开普勒行星运动第一和第二定律示意图

些,但是不论从任何一点开始,在相同的时间内,向径扫过的面积都是相同的,即图 1-10 中标以 a, b, c 的三块面积相同。这就是行星运动的第二条定律。在 1619 年他又发现了行星运动的第三条定律:“行星公转周期的平方等于轨道半长轴的立方。”这一定律可由观测得到的图 1-11 所示的轨道半长轴和周期的关系导出。有关行星运动的三条定律成为经典天文学的奠基石,从此天文学开始大踏步地前进了。后人将开普勒尊称为天空立法者。

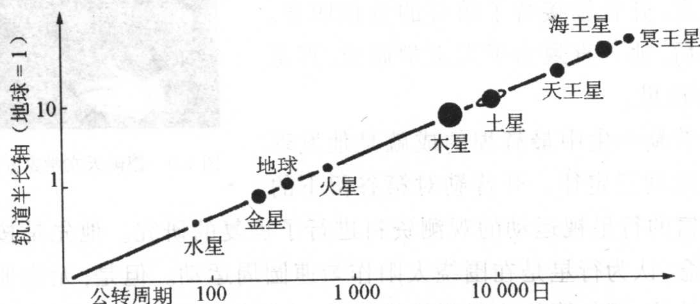


图 1-11　行星轨道半长轴和周期之间的关系

伽利略

与开普勒同时代的还有一位伟大的天文学家伽利略,他于 1564 年生于意大利比萨城。父亲希望伽利略长大后能做一名医生,但是伽利略却对数学和物理学情有独钟。他从青年时代起就对哥白尼的日心学说钦佩不已。1609 年 5 月,伽利略 45 岁的时候,制造了世界上第一台光学天文望远镜。新的望远镜瞄准的第一个天体是月亮。当时的传统观念都认为月亮是一个完美的球体,像水晶一样的光滑,伽利略在望远镜中看到的月亮却有许多圆形的山峰和峡谷,他将这些圆形的山叫做



图 1-12　意大利科学家伽利略

环形山。月亮表面还有一些面积较大的平坦阴暗区域，伽利略认为它们应该是像地球表面的海洋一样的水域，于是把它们叫做“海”。实际上月球上并没有汹涌澎湃的大海，连一滴水也没有，那些阴暗部分只是月面的低洼地。然而，月海的名字却一直沿用至今。

1610 年 1 月，伽利略用这架望远镜获得了他最卓越的发现，看到木星的 4 个卫星。后来人们将这 4 颗卫星叫做伽利略卫星。木星卫星的发现说明宇宙还有其它的“中心”。同年 8 月，伽利略看到金星不是金光灿灿的圆面，而是闪着金光的一钩“弯月”，说明金星有着与月亮类似的周期圆缺的变化。他指出，金星和地球一样自身不发光，都在围绕太阳转动。这是对哥白尼日心说的最有力的支持。年底，伽利略又发现太阳表面上有黑子，并且根据黑子在日面的移动情况，证明太阳本身也在自转。这一切观测发现都与地球中心论相违背，成为日心说的有力证据。

1633 年，伽利略已届古稀之年，他一生中的辉煌成就驰名全欧洲，受到科学界乃至世人们的尊敬。然而，就在那一年，由于他长期坚持宣扬哥白尼的日心说，被反动的罗马宗教法庭判处终生监禁。

3. 牛顿和万有引力定律

开普勒只是从观测数据中发现了行星运动三大定律，但他却不知道其物理原因。英国物理学家牛顿追本穷源，建立起一套能解释这些关系的物理理论。



图 1-13　英国科学家牛顿

牛顿 1642 年生于英格兰东部的一个小村庄，家境贫寒，多灾多难。1661 年，牛顿 18 岁的时候进入剑桥大学学数学。1665 年初，年仅 22 岁，尚未大学毕业的牛顿就实现了自己科学生涯中的第一个重大突破——发现了数学中重要的二项式定理。接着，在 1665 年夏天，伦敦因遭遇一场可怕的瘟疫，死了许多人，剑桥大学决定全校停课，迅速疏散。牛

顿在回到家乡的 18 个月中，发明了微积分，发现了白光的组成，并且开始研究引力问题。地球引力的现象是很多的，他细心观察各种现象，其中最为著名的是“苹果熟了为什么往地上掉?”的思考。他提出著名的万有引力定律，即任何物体之间都会互相吸引。若两物体的质量分别为 M_1 及 M_2，而它们之间的距离为 r，那么它们之间的吸引力 F 为

$$F=\frac{GM_1M_2}{r^2},$$

公式中的 G 为引力常量，是一个非常小的数，所以当物体质量很小时，它们之间的引力便微不足道，我们看不到日常的物体会互相吸引，便是这个原因。天体的质量很大，引力就非常明显了，由牛顿的万有引力定律很容易推导出开普勒的行星运动三大定律，建立在牛顿力学基础上的天体力学迅速发展起来。牛顿的引力理论也无孔不入地渗透到天文学研究的各个领域和课题中。

三、从经典天体物理学到现代天体物理学

从 19 世纪中叶以来，物理学的发展把天文学推到一个新的阶段，以测定天体亮度和光谱为起点的天体物理学开始蓬勃发展，并成为 20 世纪天文学的主流。以爱因斯坦为代表的新一代物理学家，创立了相对论和量子力学，也使天文学特别是天体物理学产生了巨大的飞跃，在 20 世纪初开始了现代天文学的进程。

1. 天体物理学的兴起

19 世纪中叶物理学的发展促进了天体物理学新学科的产生。天体物理学就是用物理学的基本原理来解释天体的形态、结构、物理状态、化学组成，以及天体产生和演化的科学。最先发展起来的是以测量天体的亮度和光谱为起点的光学天文学。

到 19 世纪末 20 世纪初，以爱因斯坦为代表的新一代物理学家，进行了物理学的第三次革命，创立了相对论和量子力学。物理学经历了从

经典物理到现代物理过渡的发展阶段,天体物理学也受到巨大的刺激。天文学特别是天体物理学也随着物理学的发展产生了巨大的飞跃,在20世纪初开始了现代天文学的进程。物理学的几乎所有分支学科,如原子物理学、量子力学、原子核物理学、狭义相对论、广义相对论、等离子体物理学、固态物理学、致密态物理学、高能物理学等很快就成为天体物理学新的理论基础。并逐步形成相对论天体物理学、等离子体天体物理学、高能天体物理学、宇宙磁流体力学、核天体物理学等分支学科。天体物理学也成为物理学的一个重要分支。1984年,国际纯粹及应用物理联盟设立了天体物理学委员会。

随着物理学的发展,物理学家必然要把宇宙及各种天体作为物理学的实验室,比如,中子星提供了超高密、超强磁场、超强压力和超强辐射的空间实验室。类似的例子很多。在宇宙中所发生的种种物理过程比地球上所能发生的多得多。在地球上做不到的物理实验,在宇宙中可以找到。物理学家涉足天文学领域的研究成为必然。天文学家也密切注视物理学的发展,期望用物理学的原理来解释我们的宇宙的过去、现在和将来。

天文学观测和理论研究也给物理学以巨大的刺激和挑战。如氦元素首先是在太阳光谱观测中发现的,然后再在地球的实验室中找到。对太阳及恒星内部结构和能量来源的研究获得了热核聚变反应的概念;对星云谱线的分析提供了原子禁线理论的线索;从恒星演化理论发展出元素综合理论等;白矮星的发现曾使物理学家手足无措,因为那时还没有物理理论能解释白矮星的致密态;视超光速现象的发现需要物理学家认真考虑是否存在超过光速的运动;高能天体类星体、星系核、γ射线暴等的能量来源还不能从现有的物理学规律中找到答案,等等。

2. 爱因斯坦和广义相对论三大天文学问题的验证

美籍德国科学家爱因斯坦是公认的20世纪最伟大的科学家,出生于1879年。1900年8月爱因斯坦在苏黎世工业大学毕业以后约1年左右,才找到了一份瑞士专利局的工作。他没有受过名师的教诲,没有从



图 1-14 美籍德国科学家爱因斯坦

事科学研究的条件,可是,他却对当时物理学中最困难的"以太之谜"的问题酝酿已久。1905 年作为公务员的爱因斯坦在科学上取得了丰硕的成果,在物理学三个未知领域里,齐头并进,三篇论文同时打响。一篇论文是讨论布朗运动的,以最有力的证据证明了分子的存在;另一篇论文发展了普朗克的量子论,提出了光量子假设,他因此于 1921 年获得诺贝尔物理学奖;还有一篇论文是《论动体的电动力学》,宣告了狭义相对论的诞生,开创了物理学的新纪元。

狭义相对论只针对匀速运动的情况,爱因斯坦继而进行把相对论扩展到非匀速运动情况的研究。经过 10 年的努力于 1915 年完成了广义相对论。由于广义相对论主要是数学的推理结果,所以,刚问世时,许多物理学家都视之为拼凑出来的数学游戏,不屑一顾。为了验证广义相对论的理论,爱因斯坦提出了三个可以用天文学观测来验证的广义相对论"效应"。果然,经过天文学家的努力,一一验证了这三个效应。广义相对论也由此成为一门新兴的天文学学科。

第一个效应是水星近日点附加的进动。离太阳最近的水星,每绕太阳公转一周,它离太阳最近那一点的位置就有些改变,这就是所谓水星近日点的进动。这是法国天文学家勒维耶发现的一种现象。由牛顿力学解释这一现象,水星近日点进动仍余下 43 秒找不到原因,不够完满。爱因斯坦根据他的理论,精确算出了水星轨道的正确数值,并且与观测到的数值完全一致。

第二个效应是光线在太阳引力场中弯曲。当恒星发出的光线在太阳近旁掠过时稍有弯曲。这种效应在日全食时能够观测到。第二次世界大战结束后不久,英国天文学家爱丁顿领导的日全食观测队证实了爱因斯坦根据广义相对论理论计算出的理论值是正确的。

第三个效应是引力红移。恒星发出的光谱谱线由于强大引力的作用使得发射出的光的振动频率减少了，波长就相应地增大，也就是红移了。天文学家在天狼星伴星这颗致密的白矮星中，首先验证了引力红移。

广义相对论还有一个重要的推论就是引力波的存在，这一预言也由对 1974 年发现的射电脉冲星双星系统的长期观测得到了验证。

3. 天文学与诺贝尔物理学奖

闻名于世的"诺贝尔奖"，每年一次授予在物理学、化学、生物学、医学等自然科学领域及为人类和平事业作出卓越贡献的人，至今已超过 100 年了。20 世纪以来，天文观测和物理实验、天体物理学与物理学各个分支之间的渗透逐步加强，天文观测发现的天体物理过程已是物理学实验所无法实现的，宇宙及各种天体已成为物理学的巨大天然实验室。天体物理学的一些突出成果大大推进了物理学的发展，获得杰出成就的天文学家获"诺贝尔物理学奖"就是很自然的事情了。在 20 世纪最后的 30 年中，因天文学的卓越成就而获诺贝尔物理学奖的有 7 个项目、9 位天文学家。在 21 世纪初，2002 年的物理学奖又由 2 个天文项目的 3 位科学家分享。表 2 给出荣获诺贝尔物理学奖的项目和天文学家的简要情况。

以天文学研究成果为主的诺贝尔物理学奖可以说是以 1970 年为起点。在 6 个年度，9 项物理学奖授予 12 位天文学家。20 世纪最后的 30 年中，天文学家获诺贝尔物理学奖不仅实现零的突破，而且在物理学奖中的比例还比较高。

从表 2 所列的获奖项目可以看出：全部 9 个获奖项目中与射电天文学直接有关的多达 4 项共 6 人，反映了新兴学科领域的强大生命力。这 9 个获奖项目与物理学理论和实验相关的程度非常紧密，只有赖尔发明综合孔径射电望远镜的获奖项目是纯粹的天文项目。这一事实既表明当代天体物理学在整个物理学中已具有举足轻重的地位，也表明物理学家对天体物理学的重要性之认识也已大为深化。

表 2　天文学领域获诺贝尔奖的情况

获奖编号及年代	国籍	获奖者及获奖时年龄	取得获奖成果的年龄	获奖成果	备　注
(1) 1970	瑞典	阿尔文(H.O.G.Alfvén) 62 岁	30～40	创建太阳和宇宙磁流体动力学	与另一项目分享
(2) 1974	英国	赖尔(M. Ryle) 56 岁	42	发明综合孔径射电望远镜,观测极其遥远的射电星系	与项目(3)分享
(3) 1974	英国	休伊什(A. Hewish) 50 岁	43	发现脉冲星,并证认为中子星	与项目(2)分享
(4) 1978	美国 美国	威尔逊(R.W.Wilson) 42 岁 彭齐亚斯(A.A.Penzias) 45 岁	29 32	发现宇宙微波背景辐射,支持大爆炸宇宙学	与另一项目分享
(5) 1983	美国	钱德拉塞卡 (S.Chandrasckhar) 73 岁	20 岁开始,多年成果	研究恒星结构和演化理论,确认白矮星质量上限	与项目(6)项共享
(6) 1983	美国	福勒(W.A. Fowler) 72 岁	46	创建恒星演化过程中的化学元素形成的理论	与项目(5)项共享
(7) 1993	美国 美国	赫尔斯(R.A.Hulse) 42 岁 泰勒(J.H.Taylor) 52 岁	23 33	发现第一个射电脉冲双星和间接验证引力辐射	
(8) 2002	美国	雷蒙德·戴维斯 (R.Davis Jr) 89 岁	30 多岁	X 射线天文学	与项目(9)项共享
(9) 2002	日本 美国	小柴昌俊 77 岁 里卡尔多·贾科尼 (R.Giacconi) 72 岁	40 多岁 40 多岁	中微子天文学	与项目(8)项共享

取得成果到获奖之间时间间隔最短的是休伊什发现脉冲星的奖项,但也有 7 年。任何一项研究成果都需要经受时间的考验,每项成果本身也需要完善和发展。如果仅是发现脉冲星,而不能证认为理论预言的中子星,那也不可能获得诺贝尔物理学奖的。脉冲星发现后,不仅是休伊什对证认脉冲星为中子星问题有重要贡献,其它天文学家也作出了贡

献，甚至是更重要的贡献。脉冲星的发现开辟了一个崭新的学科领域，把许许多多的天文学家和物理学家吸引来从事脉冲星的研究，这也是该发现所具有的划时代意义的表现。钱德拉塞卡在 73 岁高龄时获奖，是对他几十年的研究工作总的评价。天文研究需要有长期的计划和系统性的研究。

思考和复习题：

1. 简评我国古代天文学的成就和不足。
2. 简述托勒密的地心说，为什么这一错误的学说能统治 1500 年之久？
3. 简述哥白尼的日心说的要点及其伟大意义。
4. 什么是开普勒三大定律？它们有什么重要性？
5. 举例说明现代天文学与物理学的关系。
6. 你对本讲中介绍的哪一位天文学家的事迹最感兴趣？为什么？

第二讲

观天巨眼 400 年——光学望远镜的发展

在没有望远镜的年代,人们只能凭借自己的双眼观察各类天体来研究它们的运动规律和各种性质。自从 1609 年意大利科学家伽利略发明了天文望远镜之后,古人幻想中的千里眼变成了现实。在望远镜约 400 年历史中的前 300 多年,光学望远镜几乎是获取天体信息的惟一手段,光学天文学也几乎成为天文学的代名词。近几十年来由于射电天文和空间天文学的崛起使光学天文学失去了霸主的地位,但是全波段时代的到来并没有降低光学望远镜的作用。各个波段的观测是相互补充、相互促进的。在竞争中现代光学望远镜又有了惊人的发展。当年伽利略望远镜的口径仅仅 4 厘米多,而今全世界口径 8 米以上的大望远镜,已经至少有 10 台。特别是 1990 年,重达 11 吨、主镜口径 2.4 米的哈勃空间望远镜发送上太空,克服了地球大气的干扰,一下子使它的分辨率和灵敏度远远超出当时地面最强大的光学望远镜。不久以后,地面上的望远镜采用自适应光学系统和干涉等尖端技术,又在许多方面超越了哈勃空间望远镜的观测能力。

一、天文望远镜的发明和早期光学望远镜

光学天文望远镜主要有三大类:折射式望远镜、反射式望远镜和折反射式望远镜。折射式望远镜利用透镜作主镜收集光线并将光线屈折到焦点上。反射式望远镜则使用一块凹面镜作主镜,将入射光线反射后会聚到焦点上。折反射式则是在反射镜的基础上在入口处加一块称为修正镜的透镜。

1. 人类第一架光学望远镜——伽利略的折射式望远镜

1609年意大利著名物理学家伽利略受荷兰眼镜商磨制小望远镜的启发发明了人类历史上第一架天文望远镜。伽利略制造的天文望远镜都是折射式望远镜,是用一块凸透镜作物镜,一块凹透镜作目镜(图2-1)。虽然他研制的几架望远镜的口径都只有几厘米,但却获得了许多震惊世界的新发现。他发现了太阳表面的黑子,月球表面凹凸不平的环形山,木星的4颗卫星,以及金星的圆缺变化。更令人吃惊的是,当他把望远镜对准了夜空中那条柔和的光带——银河时,看到了多如牛毛的星星。

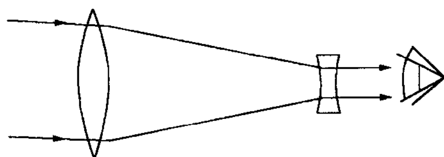


图2-1　伽利略折射式望远镜的原理图

伽利略的望远镜能够看到的范围(即视场)比较小。与伽利略同时代的著名德国天文学家开普勒对伽利略的光学系统做了改进,用凸透镜作物镜,同时用凸透镜作目镜。这种光学系统的特点是视场大,成倒像。对于日常使用的观景望远镜来说,看到一切事物都是倒的,当然很别扭,但对观测天体来说,正像和倒像就没有什么差别。这个系统有一个方便之处,就是可以在目镜前加装十字丝,适于做天文观测。开普勒望远镜

在 17 世纪曾风靡一时。

由于玻璃对各种颜色光的折射率各不相同，用单透镜作物镜会产生严重的色差。色差是天文观测中的大忌，它会使一个观测目标变成一个色彩斑斓的光环。为了解决这个问题，后来的折射望远镜都不再用一块透镜作物镜，而是用两三块或更多块折射率不同的玻璃组合在一起作为一个物镜使用，成为消色差的光学系统。常用的有双胶合物镜、双分离物镜、三分离物镜，等等。

2. 牛顿发明反射式望远镜

折射镜的一个重大缺陷是会产生色差。牛顿是首先了解色差产生原因的科学家。在 1666 年，他做了一个著名的光学实验，让一束白色的太阳光穿过一块棱镜，白色的阳光被分解成赤橙黄绿青蓝紫的七色光带。他还发现不同颜色的光在透镜中的折射角度不一样。为避开折射望远镜的这一缺陷，牛顿开始研制反射望远镜。

反射镜与透镜一样，也具有聚光的本领。17 世纪中叶已经有几位科学家从理论上提出可以使用反射镜做望远镜的建议。使用折射望远镜观测时，光线从镜筒的一端射进来，观测者的眼睛在另一端观测。这是一种非常自然的状态。反射望远镜的情况就完全不同了。光从镜筒的一端射进来，射到反射镜上，又返回到同一端，观测者如果在入射端观测物像，那么它就会挡住光线的入射。这个问题曾使天文学家为难。

牛顿用青铜凹面镜来代替凸透镜作物镜，再在这面凹面反射镜的焦点位置上倾斜的放置一小片平面镜，把会聚后的光再反射到目镜上（见图 2-2）。这就是世界上第一架利用光的反射原理制成的反射式望远镜，后来人们就把这种类型的望远镜称之为“牛顿式望远镜”。

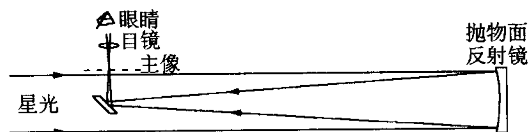


图 2-2 牛顿式反射望远镜光路图

牛顿式反射望远镜的光学系统是反射系统中最简单的一种。图 2-2 是牛顿式反射望远镜的光路图。由三部分组成，一是作物镜的抛物面镜，二是平面反射镜，三是目镜。由前端入射的光被反射镜会聚到一块平面镜。平面镜是斜着放置的，以便把光线反射到安装在镜筒侧面的目镜上。牛顿式光学系统的相对口径一般为 1/3 到 1/5，它的特点是光力强，像质优良。

用反射镜作物镜的望远镜光学系统叫做反射系统。反射镜都是凹面镜，光线射到凹面镜上反射后会聚成像。因为所有波长的光的入射角和反射角都一样，光线反射后不会分散，因而没有色差的问题。如果凹面镜是抛物面的话，反射后的光线都将会聚到焦点上。由于抛物面磨制起来比较困难，往往磨制成球面镜。但是因为射到球面镜上的平行光不能会聚到一个点上，所以会有球面像差产生。

1672 年法国天文学家卡塞格林发明了一种反射系统，由抛物面镜物镜、双曲面副镜和目镜组成(见图 2-3)。它比牛顿式反射系统更巧妙，在主镜中心区开了一个圆孔，来自天体的光经过抛物面镜反射后，再经双曲面镜反射，经过圆孔，聚焦在主镜的后面，使观测者视线方向与镜筒指向成一致，观测起来方便自如。这种系统主副镜都不是球面镜，加工难度大，制作成本高，但它的光学质量极佳，因此在大望远镜中经常使用。

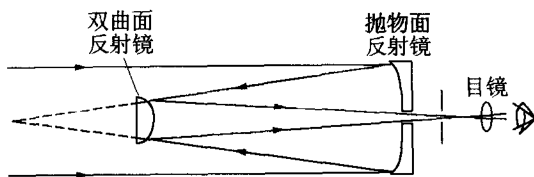


图 2-3　卡塞格林系统的光路图

由于反射系统的主镜重量较轻，比起折射镜来镜面容易做大，又不会产生色差的干扰，因此大口径的望远镜都采用反射式。但反射镜的磨制精度要求很高，而且要保持反射镜面的表面光亮度还需经常重新镀膜。反射望远镜发展非常快，成为光学望远镜的主流。目前世界上最优秀的望远镜都是反射望远镜。

3. 赫歇尔和罗斯的反射式望远镜

赫歇尔是比牛顿整整晚了一个世纪的人。他的一生当中共磨制了数百架望远镜,在研制反射式望远镜方面做出了重大贡献。他用自己磨制的一架口径15厘米的牛顿式望远镜发现了天王星。1786年,他实施了一项令世人震惊的计划,制造了一架当时世界上最大的口径达1.2米的反射望远镜。镜筒长12米,依靠一个15米高的木构架竖立起来,就像一尊指向天空的巨型大炮,被人们称为赫歇尔的"大炮"(图2-4)。

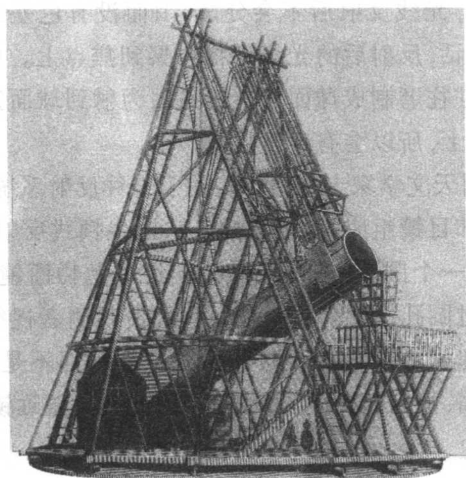


图2-4 赫歇尔的"大炮"

在赫歇尔之后大约100年,出身名门望族的英国天文学家罗斯伯爵花费了20多年的时间,先后制成了四架反射望远镜,口径一架比一架大,最大的一架口径达1.84米,曾雄霸一时。它的镜筒直径2.4米,长17米,有五六层楼高。人们用城堡来形容它(图2-5)。罗斯用它首次发现蟹状星云具有纤维状结构,就像是一只只的螃蟹腿。罗斯将它命名为蟹状星云,这个名字至今未变。

镜面越大,会聚光线的能力越强。聚光能力越强,望远镜可以"看到"的空间就越深。目前世界上的大型望远镜基本上都是反射式的,最

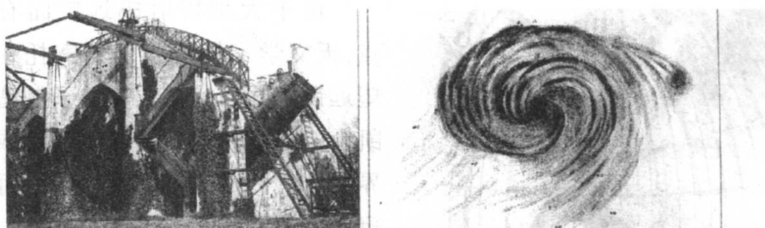


图 2-5　罗斯的“城堡”(左)和他描绘的螺旋星云(右)

大的反射镜面口径已达 10 米,而最大的折射式望远镜的口径仅有 1 米。

4. 克拉克父子创造折射望远镜的辉煌

自 1668 年牛顿发明了反射望远镜之后,200 多年以来,天文学家的主要精力都放在反射望远镜的研制上。折射望远镜的发展极为缓慢,直到 19 世纪中叶,这种局面才被打破,而打破这种局面的,竟是美国的一对画家父子。

克拉克父子是马萨诸塞州的画家。老克拉克(1804—1887)非常热爱天文学,他不满足于一般的观察星空,决心自己动手磨制望远镜,所不同的是他打算磨制折射望远镜。他关闭了画室,专心致志地研磨透镜。1860 年,密西西比大学名誉校长巴纳德决定要为他的大学造一架口径 47 厘米的折射镜,这将成为美国首屈一指的最大折射镜。克拉克父子仅用了两年时间就完成了这项任务。他们用这架望远镜发现了天狼星的伴星——人类发现的第一颗白矮星。

1870 年,美国海军天文台出资 5 万美元,请克拉克父子为该台造了一架物镜口径 66 厘米的折射式望远镜。海军天文台的天文教授霍尔用这架望远镜发现火星的两颗卫星。

此后,在两个金融家的资助下,克拉克父子造出了两架更大的折射望远镜。一架是金融家詹姆斯·里克出资,口径 91 厘米的折射望远镜——里克望远镜。另一架由大金融家叶凯士出资,由小克拉克制成的口径 102 厘米的望远镜,称为叶凯士望远镜,被安装在芝加哥西北约 130 千米、海拔 73 米的日内瓦湖边的叶凯士天文台(图 2-6)。

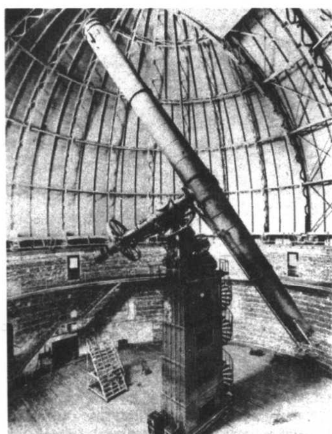


图 2-6 小克拉克制造的
102 厘米折射望远镜

由于大型折射望远镜固有的缺点，天文学家把希望仍然寄托在反射望远镜上。因此克拉克父子制造的叶凯士望远镜和里克望远镜也就成为世界上最大的两架折射望远镜，而且在冠亚军的宝座上一直坐到今天。

5. 施密特的折反射望远镜

不论是折射镜还是反射镜，都有自己的优缺点。折射镜视场大，每次可以观测较大范围的天区，反射镜的清晰度高而视场小，每次只能看见几平方角分的天区，如果用大型反射镜做巡天观测的话，大约要耗费几千年甚至上万年的时间才能把整个天空巡查完。怎样才能把这两者的优点集于一身呢？这是天文学家多年以来梦寐以求的愿望。20 世纪 30 年代，德国光学专家施密特的巧妙设计使天文学家的这一愿望变成了现实。

勃恩哈德·施密特（1879—1935）本是俄国人，在俄国上学只读完高中二年级就从学校走上社会。22 岁来到德国，学习工程技术，后来改攻光学。1926 年，47 岁的施密特来到汉堡天文台工作。他要超越前人，研制一种融折射镜和反射镜的优点为一体的新型望远镜。经过 4 年的努力，在 1930 年研制出一架主镜口径 48 厘米，修正镜口径 36 厘米的折反射式望远镜。这个光学结构的设计复杂，但他却主要用手工操作，而且还是靠他仅有的一只左臂研磨完成工艺要求非常高的光学系统。

这种折反射式望远镜的光路非常巧妙，它的一块球面主镜放在镜筒的后边，一块波浪形的透镜作为改正镜放在主镜前适当的位置。改正镜与主镜的口径比例大约为 2∶3。望远镜的焦点不是聚焦在一个平面上，而是聚焦在一个曲面上。施密特望远镜兼顾了折射镜和反射镜的优点。球面反射镜作主镜会产生球差，影响成像质量，而波浪形的透镜正好能

改正光线经过反射镜时所产生的各种像差，使望远镜得到了像折射镜一样的大视场和像反射镜一样的高清晰度。施密特望远镜非常适合作天体摄影工作，可获得大面积天区的高清晰度照片(见图 2-7)。

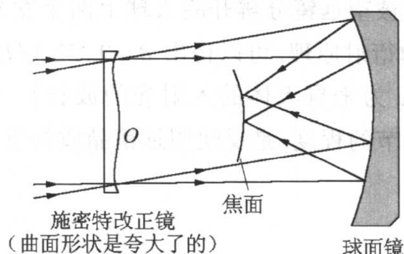


图 2-7　施密特望远镜的光路图

百折不挠的施密特成功了，然而他却积劳成疾，于 1935 年 12 月 1 日，年仅 56 岁时就去世了。为了缅怀施密特的伟大功绩，后来，人们将施密特设计的这种折反射式天文望远镜统称为施密特望远镜。

施密特望远镜在世界各国天文台中得到了广泛的应用，我国的几大天文台中也都安装有口径不同的施密特望远镜。目前，世界上最大的施密特望远镜在德国史瓦西天文台，它的主镜口径 200 厘米，改正透镜口径为 134 厘米，视场达 3.4°×3.4°。

二、光学望远镜的几个重要参数

光学望远镜的种类繁多，大小不一，但是可以由一组参数来决定它们的主要性能。其中分辨率、极限星等和视场最为重要。

1. 物镜口径、物镜焦距和相对口径

物镜口径是望远镜聚光本领和分辨率的主要标志，一般是指有效口径 D，即望远镜经过镜框限制以后所能接收到的最大光束的直径，也叫通光直径或入射光瞳。物镜焦距 f 是天体摄影时底片比例尺的主要标志，焦距越长，拍摄到的天体的尺寸就越大。望远镜有效口径 D 与焦距

f 之比叫做相对口径或相对孔径,用 A 表示,即 $A=D/f$。

2. 分辨角

分辨角是刚刚能被望远镜分辨开的天球上两个发光点之间的角距,用 δ 表示。根据光的衍射原理,可以得出 $\delta=1.22\lambda/D$(其中 D 为望远镜物镜的有效口径,λ 为来自天体的入射光的波长)。分辨角表示望远镜能观测到的天体细节的程度,是反映望远镜品质的重要指标。

3. 极限星等

极限星等是表征望远镜灵敏度的参数。将望远镜指向天顶区域,用肉眼透过望远镜所能看到的最暗的恒星星等,称为极限星等,用 m_B 表示。极限星等与望远镜的有效口径、相对口径、物镜的吸收系数、大气吸收系数和天空背景亮度等多种因素有关。极限星等可以由以下经验公式

$$m_B=6.9+5\lg D$$

来估计(式中望远镜有效口径 D 以厘米为单位)。

4. 放大率

放大率用 G 表示,它近似地等于物镜焦距 f 与目镜焦距 f' 之比,通常就将 $G=f/f'$ 算做望远镜的放大率。由于一架望远镜的放大率不仅与物镜焦距有关还与目镜焦距有关,因此在同一架望远镜中只要选择不同的目镜就会得到不同的放大率。放大率并不是望远镜品质的最主要标志,过分追求高放大率是没有意义的。其实大型望远镜并不是要把天体放得很大,而是要收集更多光线,获得更清晰的图像。一般放大率应控制在物镜口径毫米数的1～2倍之间。

5. 视场

视场是指能够被望远镜良好成像的天空区域,直接在观测者眼中所张的角度称为视场或视场角,用 ω 表示。望远镜的视场一般都是在设计

时即已确定的，它与放大率成反比，放大率越大，视场越小。

三、天文望远镜的终端设备

早期的天文望远镜只做目视观测，终端设备也只有目镜。后来，随着科学技术的不断发展，终端设备逐渐增加了摄影系统、光电光度计、光谱仪、电荷耦合器件(CCD)等等。

1. 目镜

目镜与物镜一起组成了目视的望远镜。由于天体距离我们十分遥远，我们可以把天体射来的光束都看做是平行光。平行光束射入物镜以后聚焦在物镜的焦平面上，这个焦平面同时也是目镜的焦平面。光束通过目镜以后又以平行光束进入人的眼睛，并成像在人眼视网膜上，被人眼所接收。

2. 摄影系统

摄影技术是19世纪二三十年代由法国的艺术家发明的。1840年，美国化学家德雷珀将照相机对准月亮，拍到了人类的第一张天体照片。以后，天文学家将照相技术逐步引入天文学的各个领域，使摄影系统成为天文望远镜上一种十分重要的终端设备。

与目视观测相比，照相观测具有许多优越性。首先，它能将宇宙中瞬间发生的现象客观地、真实地记录下来，并可长期保存，供人们分析、研究和交流；其次，由于照相底片具有积累效应，有些目视观测看不见的暗弱天体，却可以通过长时间的曝光在底片上显现出来，用小望远镜得到了大望远镜的效果。因此，在现代各种高科技手段尚未问世之前，照相技术在天文观测中得到了十分广泛的应用，而且人们也通过照相方法获得了弥足珍贵的天文发现，如日珥、冥王星、小行星等等。

3. 光电光度计

19世纪末期，物理学家发现光照射到某些物质上能产生电流，入射

光的强弱变化也会引起电流的强弱变化，这种现象称为“光电效应”。光电倍增管就是根据这一现象制造出的光电转换器件。20世纪初期，测量天体的光度及其变化的光电光度计就是将光电倍增管作为天文望远镜的终端设备。光电光度计可设计成单通道、双通道和多通道。它们的原理都是相同的，只是通光孔的数目不同，测量的精度和速度也有所不同。现代的光电倍增管可以将由光转化来的电流放大几亿倍至几百亿倍，使光电光度计测光的灵敏度达到0.001星等，大大超过了照相底版，成为现代天文学中观测天体的一种有力手段。

4. 光谱仪

天体光学波段的辐射呈现连续谱的形式，但是有一个明显的峰值，峰值处的波长由天体表面的温度决定。在连续谱上还叠加了很多线状光谱，一种是明亮的线，称发射线；一种是暗黑的线，称吸收线。发射线和吸收线由天体的化学成分决定。天体的许许多多奥秘都隐藏在它们的光谱中。

获得天体光谱的仪器叫光谱仪，也叫摄谱仪。摄谱仪由狭缝、准直镜、色散元件、成像镜及底片组成。狭缝的作用是从望远镜收集到的天体光束中取出一小条光；准直镜是将这一小条光变成平行光束；色散元件可以是棱镜也可用光栅，它的作用是将平行光束分解成彩色光谱；成像镜的作用是将彩色光谱成像在它的焦平面上；放在焦平面上的照相底片就可以获得光谱的像了。假如用光电接收元件代替底片，就变为灵敏度大为提高的光电分光仪。

5. 电荷耦合器件(CCD)

CCD是英文charge-coupled device(电荷耦合器件)的缩写。由极薄的硅晶片制成，硅片被分成几百万甚至几千万极其微小的单元，称为像素。当入射的光子撞击到一个像素上，光子立即转变为电子并被传输到输出端的记录器上。由计算机处理把各个像素上来的信息转换成图像。这些器件可以探测出从蓝光到红光波长范围内的光线，CCD在观测效率

上比照相底片有了很大的进步，它们记录光源亮度的准确度比照相底片要大得多。因此 CCD 是天文学研究当今理想的终端设备。目前 CCD 技术已被用到数码相机上，走进了千家万户。

四、当代大型光学望远镜

自从 1948 年口径为 5 米的海耳望远镜建成后，发展大型光学望远镜成为世界潮流。10 余台口径 8 米以上的大望远镜成为地面光学望远镜的主流。镜面拼接技术和主动光学尖端技术的应用克服了制造大型光学望远镜的巨大困难。我国正在建造的“大天区面积多目标光纤光谱望远镜”(LAMOST)也将跻身国际大型望远镜之列。欧洲南方天文台甚大望远镜和美国的凯克望远镜应用光学干涉技术，成为分辨率最高的地面光学望远镜。

1. 海耳望远镜

海耳是美国著名的天文学家，制造光学望远镜的奇才。1918 年海耳研制完成的一架口径 2.5 米的反射式望远镜安放在威尔逊山天文台的山顶上。著名天文学家哈勃就是使用这架望远镜获得了许多重大发现，如发现河外星系的存在和哈勃定律。然而，海耳并未因此而满足，1929 年，他得到了美国金融大亨洛克菲勒的资助，开始建造 5 米望远镜。这是一个巨大的飞跃。1934 年开始动工，历尽艰辛，直到 1948 年才最后完成，放置在帕洛马山上。它的镜筒长 17 米，重 140 吨，有六七层楼那么高，整个装置可动部分的重量达 500 多吨，然而动作起来却方便灵活(图 2-8)。

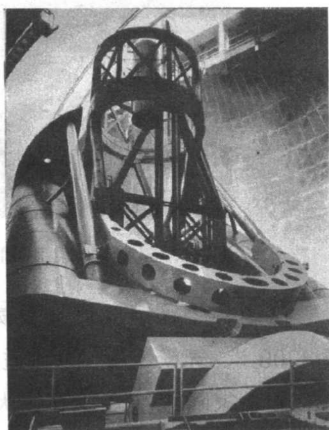


图 2-8　美国帕洛马山上口径 5 米的海耳望远镜

人们亲切地称它为海耳的大眼睛。可惜海耳在1938年去世,为纪念他这个望远镜被命名为海耳望远镜。1969年,威尔逊山天文台和帕洛马山天文台合并,并命名为海耳天文台。在1990年凯克望远镜建好之前,海耳望远镜一直是地面上最优秀的望远镜,可以观测到20亿光年之远、暗至23等的天体。它的巡天观测星表成为其它波段,如射电、红外、紫外、X射线等的观测寻找光学对应体的权威资料。

2. 凯克望远镜

在80年代以前,人们还根本不敢想像能制造出比5米口径的海耳望远镜还大的镜子。因为镜面越大,制造起来的困难就越多,不仅是镜面太重不易安装,而且由于地心引力和温度变化都容易引起镜面变形,使之难以正常工作。然而,天文学家一直在想方设法研制更大口径的望远镜以观测更远更暗的天体。20世纪80年代,美国加州理工学院的天文学家利用最新技术开始建造两台口径10米的光学、红外两用望远镜,成为特大型光学望远镜的杰出代表(图2-9)。

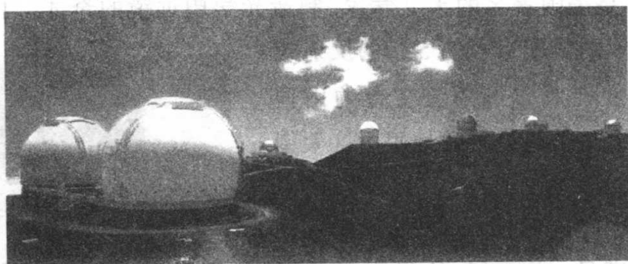


图2-9 凯克望远镜Ⅰ和Ⅱ分别安装在左边这两个大油罐形的圆顶里

这两台望远镜放置在夏威夷的莫纳克亚山上,这是一座死火山,海拔4700米,气候干燥,特别适合天文观测。从20世纪60年代起,各国的天文学家陆续把新研制的大型望远镜放到这里,已形成一个规模宏大的天文观测基地。两台10米望远镜用资助者的名字命名,分别称作凯克Ⅰ号镜和凯克Ⅱ号镜。两架望远镜共花费了1.8亿美元,分别于1990年和1996年建成。由于采用全新的镜面拼接技术和主动光学方法,才

有可能使凯克望远镜主镜的口径大到10米。主镜由36块小镜面拼合而成,每块小镜面都为六角形,口径1.8米,厚7.6厘米,重400千克。这样,整个主镜重不到18吨。采用主动光学方法,在每一个小镜面之后配备了高精度的传感器,可以自动调整它们的位置,以保证望远镜转动起来以后,始终保持为一个完整的理想镜面。凯克Ⅰ号和Ⅱ号都配有目前世界最先进的CCD照相机。

目前,天文学家正在计划利用光的干涉原理,将凯克Ⅰ号和Ⅱ号联合起来,组成一个光学干涉仪。届时两个"凯克"同时观测同一个天体,接收的光信号经过干涉作用,其分辨率将会达到一面85米主镜的效果,85米正是两个"凯克"之间的距离。

3. 欧南台的甚大光学望远镜

20世纪60年代,比利时、法国、德国、荷兰、瑞典、丹麦、意大利和瑞士等八个欧洲国家联合建设了设在智利中部拉西利拉山上的欧洲南方天文台。一架又一架现代化的观测设备不断地在这里安家落户,到80年代末期总共有15架望远镜,布满了整个山头。1987年12月欧南天文台决定建造甚大光学望远镜(Very Large Telescope,简称VLT)。它由4台口径8.2米的光学望远镜组成,耗资5亿美元。由于拉西利拉山上已经没有VLT的立足之地,只能另选地方,在附近的帕瑞纳山找到了理想的地方。这里干燥得令人难以想像,往往一年没有一场雨,某些地区甚至连续100年也没有下过一滴雨,是一块荒无人烟的不毛之地。这里一年里有350个晴天可以做光学观测,而且空气非常干净,能见度极好,又没有任何灯光干扰,成为天文学家的天堂。

VLT的4面主镜,是人类曾经磨制过的最大的镜片,每个重达22吨。从侧面看它们的形状呈新月形,像一个蛋壳的一小片。直径为8.2米,但厚度只有18厘米。望远镜采用地平装置,具有垂直轴和水平轴。

第一台VLT(VLT Ⅰ)从1998年5月份开始试观测,照片质量都非常好。另外3台望远镜也陆续投入观测。VLT的4个望远镜,既可单独使用又能以多种方式组合起来作为光学干涉仪使用,将成为世界上聚光

能力最强、分辨率最高的光学望远镜(图 2-10)。全部 4 个望远镜组成的干涉仪要在 2006 年完成。有人预言,VLT 的成功意味着在光学和红外天文学领域,欧洲将取代美国领导世界潮流。

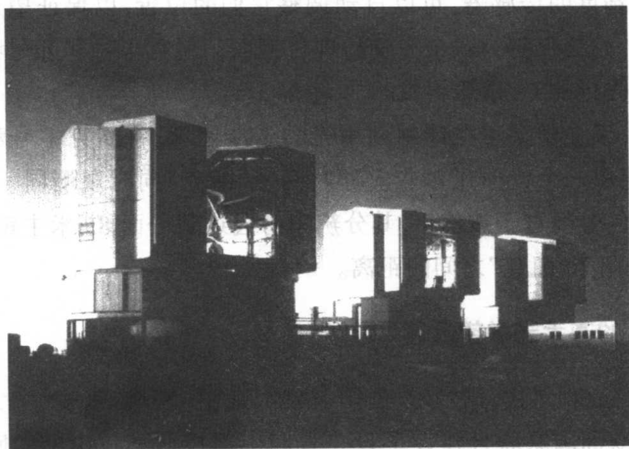


图 2-10　欧洲南方天文台的 VLT

4. 日本的昴星团望远镜

昴星团是夜空中最美丽的一个疏散星团。日本天文学家用美丽的天体名字来命名自己最珍贵的仪器,也可以看出他们对这架仪器所寄予的厚望。它的主镜是整块的巨大的直径 8.3 米的反射镜。造价为 3.7 亿美元。2000 年底部分投入科学观测。这架日本惟一超大型望远镜具有多种用途。它有 3 个副镜和 4 个不同的焦点,还有 7 个附属仪器。既适于做可见光观测,又适于做红外观测。它配备了主动光学系统和自适应光学系统以保持主镜的最佳曲率和消除大气扰动对星像质量的破坏。

为了让昴星团望远镜能够最充分地发挥出它的作用,日本的天文学家将它安置在全世界天文观测的最佳地点——美国夏威夷的莫纳克亚山上,与著名的凯克Ⅰ和凯克Ⅱ成了邻居。昴星团望远镜的观测室很有特色,它不是我们常见的圆包形,而是一个圆柱形,这是为了减小局部的大气湍流对观测的影响。圆柱形建筑物周围安放了 20 台遥控风扇用来

帮助改进主镜上方的气流。

昴星团望远镜投入使用以后,立刻显示出它的威力。如发现冥王星和它的卫星查龙的表面成分有很大的差别。冥王星表面有许多甲烷且见不到水冰,而查龙的表面却是被水冰覆盖,见不到甲烷。"昴星团"优良的成像质量已经成为日本天文学家的骄傲。

5. 七国联合制造的双子望远镜

美国、英国、加拿大、澳大利亚、智利、巴西和阿根廷等七个国家共同出资近2亿美元研制了两架完全一样的口径为8.1米的望远镜,并将它们命名为双子望远镜。这两架望远镜中的一架安装在夏威夷莫纳克亚,称做北双子(图2-11),另一架安装在智利中部海拔2950米的色洛·托洛洛,称做南双子。

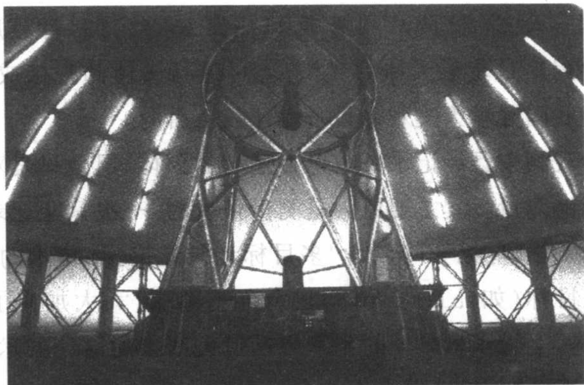


图2-11 北双子望远镜

双子望远镜虽然也配备了可见光照相机和摄谱仪,但是它的主要功能还是用于对天体红外波段的观测。红外光的波长较长,对大气扰动的敏感程度比可见光差,因此在红外波段获得的图像必然比同样口径望远镜的光学波段的图像更为清晰。红外观测还有一个优点,就是红外光能够穿透尘埃,而可见光却会被尘埃吸收。所以使用红外望远镜观测我们的银河系或是邻近的其它星系,能够看得更深更远。

口径 8.1 米的双子主镜,厚度仅有 20 厘米,做到这样薄是为了减轻重量。主镜加上它的支架,以及主动光学系统和自适应光学系统等一系列附属设备,总共重量为 377 吨。这样一个庞然大物,静静地安放在它的底座上,底座与支架之间一层薄薄的油膜保证了它能够安静而轻快地转动。

北双子于 1999 年 3 月进行了第一次试观测。得到的天体图像非常清晰,分辨率达到了 0.08 角秒,这样的分辨本领相当于能区分开 3200 千米之外的一辆汽车的两只前车灯,比口径 4 米的望远镜提高了 10 倍,比哈勃空间望远镜还略胜一筹。

6. 中国大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)

我国的望远镜与发达国家相比尚有一定距离,目前我国最大的光学望远镜在国家天文台兴隆观测基地,口径 2.16 米,1994 年建成。这架望远镜的主要用途是获得天体的光谱,也可进行天体的直接成像观测,但视场较小。我国光学天文观测设备是比较落后的。

在光学观测中已经记录下数以百亿计的天体,但是只是对极少数天体进行过光谱测量。其主要原因是测量很费时,一次只能记录一个天体的光谱。到了 20 世纪 80 年代,“多目标光纤光谱学”技术的发展,可以同时对多个目标(如几百个天体)进行光谱测量,大大加快了测量的速度。目前国际上的 4 米口径的光学望远镜大都采用这一技术。然而,这些望远镜的视场都很小,都小于 1 个平方度。第一节所介绍的施密特的折反射望远镜具有大视场的优点,但口径很难做大。我国天文学家王绶琯院士、苏定强院士和陈建生院士等提出大天区面积、多目标光纤光谱望远镜(简称 LAMOST),突破了不能兼备大口径和大视场的难关。利用多目标光纤光谱测量技术,可以同时观测 20 平方度视场中多达 4000～6000 个天体的光谱,远远超过世界上其它大型望远镜的性能,成为世界上光谱获取率最高的望远镜。

LAMOST 是一架横卧南北方向的准中星仪式反射施密特望远镜。

球面主镜口径6米,由37个六角形子镜组成,固定不动。曲率半径为40米,具有20米的焦距和5度的视场。放置在球面主镜的球心处的改正镜口径为4米,由24个六角形子镜组成。改正镜的支撑为地平装置,通过调整改正镜的指向来选择待观测的天区,在被观测天区过中天时可跟踪1.5小时。在跟踪过程中,通过主动光学系统控制以保持所需的非球面形状并消去球差。这是导致大视场和大口径相结合的关键技术,是中国天文学家的创造(图2-12)。

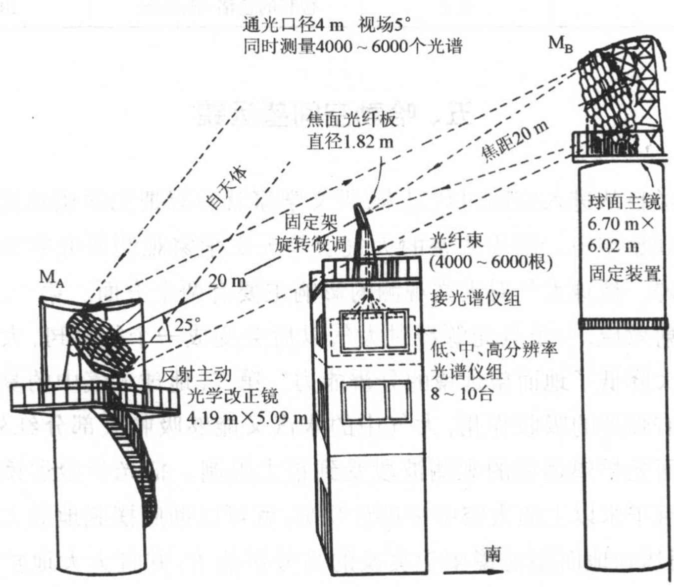


图2-12 LAMOST结构和光路示意图

LAMOST的投资为2.35亿元人民币。它将安装在国家天文台兴隆观测基地。LAMOST将使我国天文学在大规模光学光谱观测中,在大视场天文学研究方面,居于国际领先的地位。

表 3 世界上最大的光学望远镜一览表

望远镜名称	有效口径/米	安放的地点	试观测时间(年份)
凯克Ⅰ	10	夏威夷的莫纳克亚	1990
凯克Ⅱ	10	夏威夷的莫纳克亚	1996
霍比-艾北尔里	9.2	德克萨斯的佛克斯山	1996
昴星团	8.3	夏威夷的莫纳克亚	1999
VLT Ⅰ	8.2	智利的帕瑞那	1998
VLT Ⅱ	8.2	智利的帕瑞那	1999
VLT Ⅲ	8.2	智利的帕瑞那	2000
VLT Ⅳ	8.2	智利的帕瑞那	2000
北双子	8.1	夏威夷的莫纳克亚	1999
南双子	8.1	智利的色洛·托洛洛	2000

五、哈勃空间望远镜

人类自从进入空间时代以来,天文学家就梦想把光学望远镜送到太空中去观察宇宙。因为浓密的大气层是天文学家观测研究宇宙天体的一大障碍。地球大气对天文观测的影响主要有两个方面。第一,大气对光有衍射效应,一个点光源经过大气以后会变成一个衍射斑,大气衍射效应大大降低了地面望远镜的分辨能力。第二,地球大气中的臭氧对紫外辐射有强烈的吸收作用,大气中的水汽又能够吸收大部分红外辐射,因此地面光学望远镜的观测波段受到很大限制。把光学望远镜送到距地面几百千米以上的太空中去进行观测,就可以彻底摆脱地球大气的干扰,从而达到地面望远镜望尘莫及的高分辨能力,并且大大地扩展了观测波段,从紫外一直到红外,比地面光学望远镜的观测波段宽很多。

美国宇航局 1962 年就开始酝酿空间望远镜计划,1977 年得到批准,由美国宇航局和欧洲空间局联合研制。1990 年 4 月 24 日,这架主镜口径 2.4 米的望远镜终于由“发现”号航天飞机送上了距地面 600 千米的太空轨道。用伟大的天文学家哈勃(1889—1953)的名字命名,简称 HST。它从酝酿到发射历经近 30 年时间,耗资 20 多亿美元。哈勃空间望远镜可以观测到 140 亿光年之远、暗至 29 等的天体。分辨率可达

0.06 角秒，而当时地面上的观测最高分辨率只有 1 角秒。

哈勃空间望远镜是迄今为止被送入太空的最大的天文望远镜（图 2-13）。它全长 12.8 米，镜筒直径 4.27 米，重 11 吨，由三大部分组成。第一部分是光学部分，第二部分是科学仪器，第三部分是辅助系统，包括两个长 11.8 米、宽 2.3 米、能提供 2.4 千瓦功率的太阳能电池帆板，两个与地面通讯用的抛物面天线。镜筒的前部是光学部分，后面是一个环形舱，在这个环形舱里面，望远镜主镜的焦平面上安放着一组天文观测仪器。太阳能电池帆板和天线从镜筒的中间伸出。

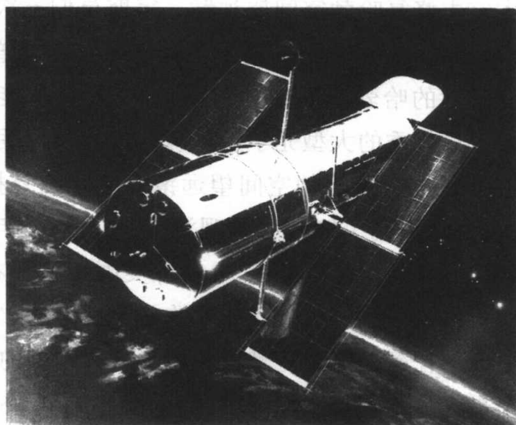


图 2-13　哈勃空间望远镜

望远镜的光学部分是整个空间望远镜的心脏，它由两个双曲面反射镜组成，一个是口径 2.4 米的主镜，另一个是装在主镜前约 4.5 米处的副镜，口径 0.3 米。投射到主镜上的光线首先反射到副镜上，然后再由副镜射向主镜的中心孔，穿过中心孔达到主镜的焦面上形成高质量的图像，供各种科学仪器进行精密处理。得出的数据通过中继卫星系统发回地面。

装在焦平面上的一组天文观测仪器有行星照相机，暗弱天体照相机，暗弱天体摄谱仪，高分辨率摄谱仪和高速光度计。还有一组精密的制导系统。为了使空间望远镜能够利用最新的技术成果，焦平面上的这

些仪器可以作不同的组合,还可以通过航天飞机上的宇航员去进行维修和更换。必要时,也可以用航天飞机将整个望远镜载回地面作大的修理,然后再送入轨道。这一功能在哈勃空间望远镜上天后就派上了用场。在设计望远镜时,一个小疏忽铸成大错,在磨制主镜的过程中把检测系统内一个光学元件的位置放错了 1.3 毫米。这样,使主镜表面偏离了设计要求,产生了球差。使得哈勃空间望远镜拍摄的天体照片的质量与地面光学望远镜拍摄的差不多,令人们大失所望。

1993 年 12 月 2 日,美国宇航局发射了载有 7 名宇航员的“奋进”号航天飞机进入太空去修复哈勃空间望远镜。宇航员们五次走出机舱,去为“哈勃”实施“手术”。最关键的是换上了能够矫正空间望远镜视力的新的光度计。修复后的哈勃空间望远镜不负众望,分辨能力大大提高,远远超过了地面上最优秀的大型光学望远镜。1997 年 2 月,由“发现”号航天飞机载宇航员到太空给哈勃空间望远镜安装了红外摄像机和多天体成像摄谱仪,大大地提高了“哈勃”的观测能力。1999 年,已经老化的空间望远镜频繁出现故障,为了救活“哈勃”,美国宇航局在 12 月 19 日将载有 7 名宇航员的“发现”号航天飞机再次送上太空,对“哈勃”进行第三次维修。最主要的任务是更换陀螺仪和增加一台新型的电脑。

哈勃镜一个最大的优点是图像清晰,能分辨小到 0.06 角秒的细节,比几年前地面观测所能达到的分辨率高出 10 倍以上。10 年来,哈勃空间望远镜已经取得了非常丰硕的观测成果,源源不断地给我们送回了许多效果极佳的宇宙天体图像资料,正在帮助天文学家解决某些最有兴趣而又难以回答的问题,如星系的起源和宇宙的年龄。

哈勃空间望远镜以其卓越的贡献揭示了宇宙中许多前所未知的秘密,然而它的使用寿命有限,大约 2010 年前后就要退役。现在,美国国家宇航局已经决定在“哈勃”的寿命终结之后再发射一架新的空间望远镜——第二代空间望远镜来接班。已经提出的几个方案具有共同的特点,人们希望下一代空间望远镜的直径达到 6～8 米,并能观测到红外波段。这两项重大的改进面临巨大的技术困难。在地面上制造 8 米望远镜已经不成问题,但是要把这样的庞然大物送上天,绝非易事。为了能

接收遥远天体的红外辐射，望远镜的温度必须非常低，否则它本身的红外辐射将把来自天体的红外辐射淹没掉。因此要把下一代空间望远镜发射到地球背太阳一面、距地球 150 万千米的拉格朗日点上，让它随着地球围绕太阳的公转一同转动，永远停留在太阳照不到的背面。这样就可以把太阳光的干扰减少到最低限度。而且，还都加上了遮阳伞的装置。图 2-14 为预选方案中的两种。

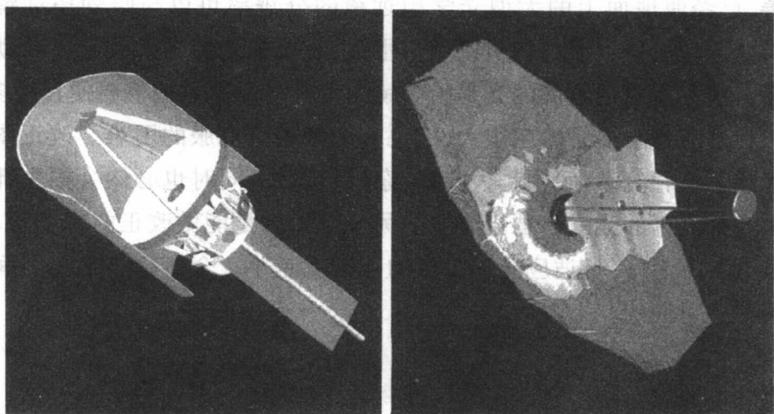


图 2-14　下一代空间望远镜的两种设计方案

六、光学望远镜的自适应光学系统

建造大型光学望远镜的目的是为了获得遥远恒星的尽可能清晰的像，分辨清天体图像的细节。但是地球大气的湍流作用使一颗遥远恒星发出的光的球面波前发生变化，波前的一些部分在不同程度上被减慢了，从而使像发生畸变。自适应光学系统就是试图通过恢复波前的球面形状来消除这种影响。

20 世纪 80 年代初期，天文学家就开始着手实验用简单的自适应光学系统去改正由于大气湍流所引起的图像的畸变。自适应光学系统首先要测出大气使星光波前变化的数据，确定波前的每一部分同其它部分的相位差有多大。然后根据这种信息来调整改正镜的形状，精确地进行

表面变形使之恰好抵消由大气湍流引起的畸变。当自适应光学系统正确工作时，波前的所有部分都应同相到达焦点，形成完全清晰的像。

自适应光学的发展使地面上的光学望远镜冲破大气湍流造成的对望远镜分辨率的极限，以致可以与哈勃空间望远镜竞争。

哈勃空间望远镜由于它处于使图像畸变的大气层之上这个优越位置，分辨率超出地面光学望远镜的 10 倍以上。自适应光学技术的逐步完善，已经使地面上的大型光学望远镜的分辨率可以与哈勃望远镜媲美。由于地面望远镜口径可以做得很大，在聚光能力上大大超过哈勃望远镜。例如凯克镜收集的光是哈勃镜的十七倍。而且造价要便宜得多。

自适应光学尽管希望很大，但也有一些很难克服的困难。改正图像的光学系统很复杂，镜面越大，越复杂，越难做。同时也必然会损失部分望远镜捕获来的光。自适应光学的另一个限制是能做改正的视场很小，而且分辨率越好，自适应光学工作的范围就越小。全面超过哈勃空间望远镜是不可能的。

思考和复习题：

1. 试说明光学望远镜的种类和主要的特点。
2. 叙述光学望远镜主要参数的定义。
3. 简单叙述光学望远镜 400 年的发展历程。
4. 现代大型光学望远镜采用什么技术克服镜面由于温度、重力变形和大气湍流带来的影响？
5. 哈勃空间望远镜与地面大型望远镜相比有哪些优点？

第三讲

震撼人心的月球探测

自古以来，人们就幻想着遨游太空，从“嫦娥奔月”的神话到我国古代火箭技术的发展，从1957年苏联的第一颗人造卫星上天，到今天太空中的人造卫星、航天飞机、宇宙飞船和空间站已构成空间一族。空间天文学是在宇宙航行时代这个大环境下快速地发展着的。天文学空间探测已成为空间科学的主旋律，已经对包括地球在内的九大行星进行空间探测，取得极其丰富的成果。我们早就知道月球上没有嫦娥和广寒宫，但是月球的悬念依旧。从1969年开始美国“阿波罗”号宇宙飞船先后6次共12名宇航员登上了月球，在月面累计停留了302小时20分钟，月面探测80小时，行程90.6千米，带回了月球土壤和岩石样品381千克。使我们对月球的认识产生了巨大的飞跃。人类登上月球的愿望终于实现了，科学家们又在策划利用月球、改造月球的宏伟计划，月球作为人类进行科学研究、开采矿藏、太空旅游，甚至移民基地的远大前景展现在我们的面前。

一、宇宙航行幻想的实现

自古以来,人们就对那深邃的太空以及那无数亮晶晶的星球有着强烈的好奇心,总幻想着飞上太空亲眼看看那里的奥秘。从神话故事到科幻小说,从古代爆竹到现代火箭,从人造卫星到宇宙飞船,人类经过从幻想到现实,逐步地进入宇宙航行的时代。

1. 从科幻到宇航之父齐奥尔科夫斯基

"嫦娥奔月"是我国家喻户晓、妇孺皆知的神话故事。18世纪以后,以科学知识为基础的幻想小说大量问世,其中有不少是描述人类宇宙旅行的,最为人们所熟知的当属法国作家儒勒·凡尔纳所著的《从地球到月球》(图 3-1)和《环绕月球》两本书。这两本书中描述了一个月球探险过程,令人吃惊的是,这个故事几乎和一个世纪之后"阿波罗"号宇宙飞船登月过程非常相似。英格兰爱德华·海尔在他的《砖月亮》一书中首次提出了人造卫星的概念。英国著名作家威尔斯的《世界大战》描写的是火星人侵犯地球的故事。《世界大战》后来在美国被改编成广播剧在广播电台播送。许多听众不知道这是根据科幻小说改编的故事,竟以为火星人真的来了,被吓得失魂落魄。

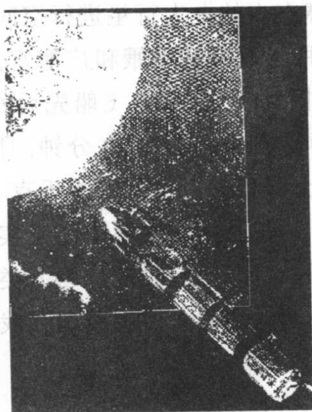


图 3-1　凡尔纳科幻小说《从地球到月球》中的插图

科幻小说在社会上产生了广泛而深刻的影响,进一步激发了人们对宇宙飞行的向往。但怎样才能挣脱地球的引力,去拜访地球的兄弟姐妹,甚至亲自到别的行星上去考察则不能依靠科学幻想。人类经过近百年的努力,终于实现了这个愿望。根据牛顿万有引力定律可以推算出,任何物体的运动速度如果达到 7.9 千米/秒,它

就可以挣脱地球的吸引力环绕地球飞行，而不再落到地面上，人们把 7.9 千米/秒这个速度叫做第一宇宙速度。这个速度比一般火车速度要快 200 多倍，照这个速度绕地球飞一圈只需 90 分钟。如果达到 11.2 千米/秒，就可以飞出地球环绕太阳飞行，这叫做第二宇宙速度。如果达到 16.6 千米/秒，就可以逃脱太阳的引力飞出太阳系，这叫做第三宇宙速度。



图 3-2　宇航之父齐奥尔科夫斯基

20 世纪初期，被誉为宇宙航行之父的俄国科学家齐奥尔科夫斯基为人类的航天事业奠定了科学的理论基础。他提出了“穿过大气层去征服整个太阳系”的具体办法，认为只有火箭才能冲出地球大气层到达宇宙空间。气球或飞机最多能飞到大约30 千米的高空，而这个高度还不到地球到月球距离的万分之一。利用多级火箭可以逐步达到第一宇宙速度那样的高速，最后挣脱地球引力，进入宇宙空间。

2. 从中国古代火箭到 V-2 火箭

火箭是中国最先发明的。我国古代民间早就流行的爆竹是现代火箭的雏形。但是，火箭也成为战争中的一种杀伤武器。据史书记载，汉朝末年诸葛亮攻打赫昭，用的就是“火箭”。明代的火箭“火龙出水”(图 3-3)是一种串联式两级火箭，点燃第一级后使龙体在水面飞行，火药燃尽时便引燃龙腹中的火箭，从龙嘴中吐出去攻击敌人。

明朝有一位名叫万户的人用 47 枚火箭捆绑在一把“飞天椅”的后面，希图利用火箭的推力把他送上天(图 3-4)。这种想借助火箭推力升空的设想比宇航之父齐奥尔科夫斯基提出的宇航设想要早几百年。万户虽然失败了，但他的尝试却使他成为人类航天事业真正的始祖。为了纪念他，国际天文学联合会把月球背面的一个环形山命名为“万户环形山”。

火箭要靠发动机向后喷射高速气体，产生反推力而向前运动。火箭

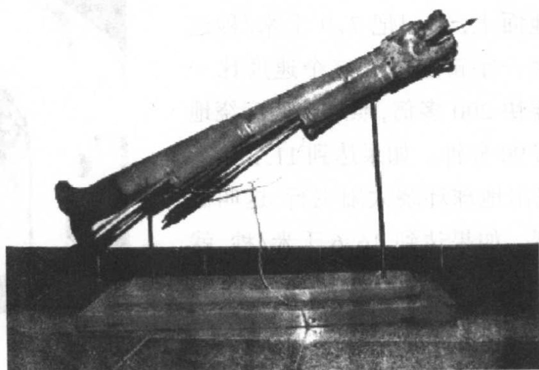


图 3-3 中国古代的二级火箭“火龙出水”



图 3-4 首次试验乘“火箭”宇航的万户

的喷气发动机与普通飞机上用的喷气发动机相类似,但有一个很大的区别。飞机起飞时喷气发动机只携带燃料就行了,燃料燃烧时所需的氧气可以从大气中获得。火箭要冲出地球大气层,它不仅要携带燃料,还必须携带助燃剂,即氧化剂。1926 年 3 月 16 日戈达德和他的助手在马萨诸塞州一个偏僻的农场进行实验的火箭是人类第一枚液体燃料火箭,虽然只上升了十几米高,但却使齐奥尔科夫斯基的理论付诸实践走出了第一步。

戈达德的液体火箭在美国未引起人们的注意,却在德国受到了重视。1927 年,以科学家赫尔曼·奥伯特为首的宇宙旅行协会成立了。1931 年,奥伯特在年轻的冯·布劳恩等的协助下试验液体火箭,火箭垂直上升高度达到了 91 米。不幸的是,他们的研究被当时德国正准备打第

二次世界大战的军方所利用。1933～1942年，冯·布劳恩研制出A-1～A-4各型的液体火箭。A-4火箭的飞行距离达到了189.8千米，飞行速度超过音速5倍，接近2千米/秒。1944年德国纳粹头子希特勒看中了A-4火箭，下令将它改进后装上炸药用于战争，进攻英国，并更名为V-2火箭。尽管V-2火箭在战争中充当了希特勒滥杀无辜的工具，但是它成功的制造技术已经让人们看到人类挣脱地球的引力、冲出大气层的日子不会太遥远了。1945年5月7日德国宣布无条件投降以后，冯·布劳恩等一批火箭专家到了美国，还有一些专家到了苏联，他们的才华和技术在那里都得到了应用和发展。冯·布劳恩到美国后成为美国第一颗人造卫星上天和阿波罗登月计划的重要人物。V-2火箭成为人类航天史上一个重要的里程碑。

3. 人造卫星大家庭

有了推力强劲的火箭以后，科学家就能把人造卫星送上太空。1957年10月4日苏联的第一颗人造卫星上天，继而又在1961年4月12日，苏联宇航员加加林乘坐“东方”1号宇宙飞船飞上太空，成为人类历史上第一位太空使者(图3-5)。苏联是一个天文学很发达的国家，对航天事业贡献很大。但是苏联在1991年12月25日正式解体。本书在涉及苏联解体前的天文学事件和成就时，仍用苏联这个名字。解体后，大多数研究工作由俄罗斯继续进行。



图3-5 人类第一位太空使者，苏联宇航员加加林

短短几十年中，世界各国竞相发展空间科学，人造卫星越来越多，形成了一个人造卫星大家庭。早期的运载火箭尺寸比较小，卫星多数采用球形或接近球形的多面体，这种外形能满足在火箭头部尺寸限制的情况下，使卫星具有最大的容积，可以安装更多的仪器设备。返回式卫星的外

形设计要比不返回的卫星复杂而又困难得多,因为它在返回地面过程中,将要穿过稠密的大气层,所以要考虑防热问题,还要考虑稳定问题。一般返回式卫星的外形都设计成钝头形。

无论人造卫星的形状以及它们的大小和重量有多么不同,它们的结构大致都是相似的。比如,它们都有用特殊材料制成的外壳,能防止宇宙空间高能粒子的侵袭;它们有坚固的骨架,能够抵抗起飞时的火箭推力和超重现象;它们有一个严格与外界隔绝的环境,能够维持卫星内部的温度和气压,使卫星上携带的各种仪表都能正常地发挥作用;它们都有能源,多数采用太阳能电池,把太阳能转变为电能,保证卫星的能量使用;它们还有跟踪、遥测、遥控、通信、轨道控制、天线等系统,以使卫星能保持与地面的联系,随时将探测到的资料和成果发送回地面等等。除此之外,需要返回的卫星还有回收系统,有特殊任务的再配有专门设计的各种专用系统。

按照用途来分,人造卫星可以分为三大类:第一类是用于科学探测和研究的科学卫星,包括空间物理探测卫星和天文卫星等;第二类是试验卫星,包括进行航天新技术试验或者是为应用类卫星进行试验的卫星;第三类是直接为人类服务的应用卫星,这类卫星数量最大,种类也最多,包括通信卫星、气象卫星、地球资源卫星、侦察卫星、导航卫星等等。

4. 宇航事业新高峰

航天飞机的发展把宇航事业推向新的高峰。与火箭只能一次性的应用不同,航天飞机可以像飞机那样反复使用,在地面和太空来往穿梭,承担施放卫星、回收卫星和进行空间修理等任务。1981 年 4 月 12 日美国“哥伦比亚”号航天飞机首飞成功,之后又有“挑战者”号,“发现”号,“亚特兰蒂斯”号,“奋进”号,苏联的“暴风雪”号航天飞机等投入使用。

空间站是空间探测发展的又一标志性的一步。空间站实际上是一种大型的人造地球卫星,除了具有普通人造卫星所应具有的各种仪器设备之外,还有一整套能够满足人们饮食起居的生活设施,保证人能较长时间住在里面生活和从事各种科学实验活动,成为建在宇宙空间中的科

学研究实验室。1971年4月19日苏联发射了第一个小型空间站“礼炮”1号。总长约12.5米，最粗的地方直径达4米，最细的地方直径为1.8米，重约18.5吨。由轨道舱、服务舱和对接舱三大部分组成。轨道舱里有各种试验设备，照相摄影器材和科学实验设备；服务舱里装有发动机、推进剂等；对接舱是准备在太空中与其它宇宙飞船对接的。宇宙飞船“联盟”号负责与“礼炮”号对接。“联盟”号载重量达2.3吨，它既可以在地面和空间站之间运送宇航员，还可以给空间站运送给养。“礼炮”号与“联盟”号对接后可以组成一个容积达100立方米的居住舱，最多可容纳6名宇航员。

“礼炮”1号空间站4月19日上天之后在太空中运行近6个月时间，完成历史使命之后于10月11日在太平洋上空坠毁。“礼炮”1号之后，苏联又陆续发射了“礼炮”2～7号空间站。美国第一座空间站的发射时间在1973年5月14日，名叫“天空实验室”，比“礼炮”系列空间站更先进。全长36米，最大直径6.7米，轨道舱内有360立方米的活动空间，先后共接待三批宇航员在那里工作。同年，美国又发射了“天空实验室”2号、3号和4号。苏联1986年推出的新型空间站“和平”号(图3-6)又有重大的改进。“和平”号有6个对接口，不仅可以分别和载人飞船、货运

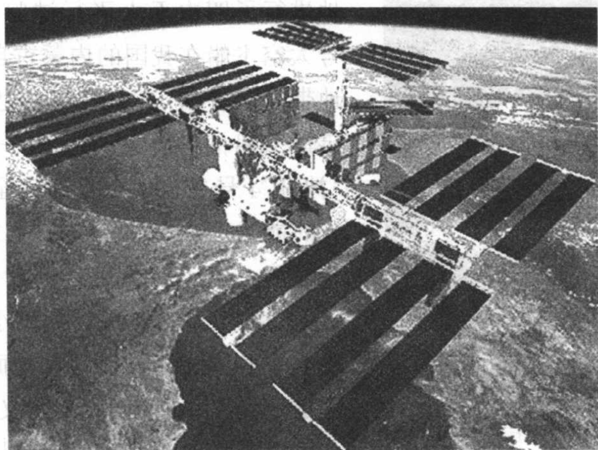


图3-6 苏联“和平”号空间站

飞船对接,还可以再与4个工艺专用舱对接。从而大大地扩大了它的科学实验范围,也大大地提高了对宇航员的生命保障。有好几位宇航员在太空连续生活达1年之久。“和平”号空间站于1986年2月20日被发射上天以后,直到2001年还在飞行,尽管超期服役10年,但仍然可以继续工作到2004年。由于俄罗斯的财政困难,无法提供经费,“和平”号不得不于2001年3月23日告别太空,结束15年的历史使命。

由美、俄及欧洲、日本、加拿大合作,共同出资准备建造一座永久性的空间站“阿尔法”国际空间站。空间站包括1个基础舱、6个实验舱、1个居住舱、2个连接舱以及后勤服务舱等。其规模是俄罗斯“和平”号的5倍,太阳能电池板展开后空间站的面积有两个足球场大,整个密封容积约为1300立方米。整个工程要耗资630亿美元,1995年开始,预计2004年完成。

5. 中国已进入宇航大国行列

中国已成为世界上第三个具有独立发射载人太空飞船能力的国家。从1970年发射第一颗人造卫星上天(图3-7),到1992年,开始逐步实现载人航天飞行的目标。从1999年11月20日到2003年1月5日,成功地进行了四次无人飞行试验。“神舟”3号太空飞船在我国的内蒙古自治区中心地带安全着陆,表明它已经达到了载人宇宙飞船的技术要求。进一步改进的“神舟”4号在技术上已经完全具备了载人的能力。在2003年10月15日9时,我国第一位宇航员杨利伟乘坐“神舟”5号飞向太空,在太空遨游21小时23分,绕地球14圈后安全地返回地面(图3-8)。这是一次伟大的有着历史意义的事件。

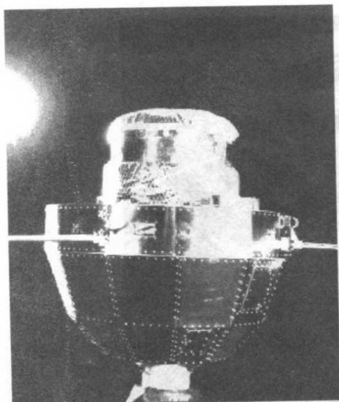


图3-7　我国1970年4月24日发射的第一颗人造卫星“东方红”1号

我国从1956年开始现代化火箭的研制工作,1964年中程火箭试飞成功



图 3-8 我国第一位飞上太空的宇航员杨利伟

后,就开始了多级火箭的研制。目前已经拥有系列的“长征”运载火箭,它们不仅承担我国空间科学的任务,还为世界各国提供服务。图 3-9 是“长征”2 号丙火箭发射升空的场面。

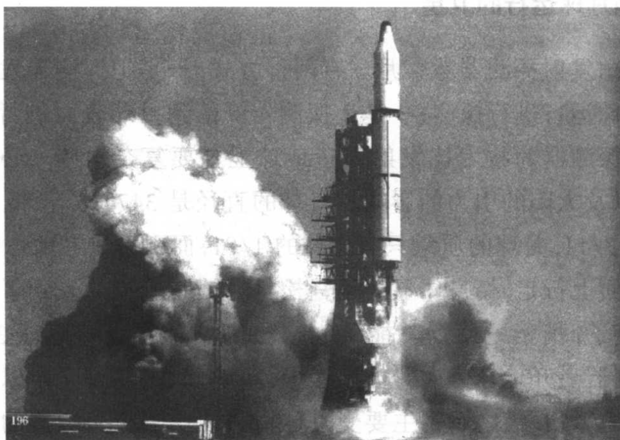


图 3-9 我国“长征”2 号丙火箭发射升空的壮观场面

我国已列出了空间开发计划，该计划中包括“嫦娥工程”探月计划和空间站的建立等。

二、美、苏月球探测大竞赛

一提到月球，人们都有一种说不出来的亲切感。古今中外，以月亮为题材的诗词歌赋、神话故事，实在是太多太多了。唐代诗圣李白的名句：“床前明月光，疑是地上霜；举头望明月，低头思故乡”；宋代大文豪苏东坡的《水调歌头》词：“……月有阴晴圆缺，人有悲欢离合，此事古难全……但愿人长久，千里共婵娟。”更有那“嫦娥奔月”的故事，从古到今，多少年来一直在我国民间广为流传，经久不衰。嫦娥奔月的故事当然不是真实的，但是故事表达了古人梦想飞到月亮上去看一看的美好愿望。

1957年苏联发射了人类第一颗人造卫星，宣布了宇宙航行时代的开始。当时，世界处于冷战时期，美国和苏联这两个超级大国时时事事都在竞争着。美苏都在角逐航天的霸主地位，月球探测方面的竞争首当其冲。

1. 发射绕月球运行的卫星

向月球发射探测器考察月球有两种方式，一是把探测器发射到月球附近绕月球运行进行探测；一是让探测器降落到月球表面进行考察。向月球发射探测器的技术比发射人造地球卫星要复杂一些。必须考虑地球、月球以及太阳的引力的影响。月球的直径是3474.8千米，大约是地球直径的3/11，月球的质量只有地球的1/81，而引力只有地球的1/6，所以人在月面上行走时，身体显得很轻松，体重60千克的人到了月球上只有10千克了，稍稍一使劲就能跳起来很高。月球距离地球38.4万千米，在探测器离开地球奔向月球过程中，离地球31.8万千米以前主要受地球引力的影响，这之后则主要受月球引力的影响。探测器的飞行路线很复杂，稍有偏差就不能到达预定的轨道。在月球表面实行软着陆要选择合适的登陆地点，由于月球上没有大气，只能采用火箭发动机来进行

制动，使探测器缓慢地降落在月球表面。

苏联最先开始对月球的空间探测。从 20 世纪 50 年代末期开始，苏联首先向月球发射探测器，经过 3 次失败之后，在 1959 年一年之内连续成功地发射了“月球”1 号、2 号和 3 号三颗探测器。“月球”1 号的速度太大，不能被月球的引力俘获，在离月球还有 5000 多千米时就脱离月球而去，成为太阳的卫星。“月球”2 号击中月球正面中央，即实现了在月面硬着陆，它虽然粉身碎骨，但却发回两条重要信息，那就是月球表面上没有强磁场，也没有强辐射。“月球”3 号绕月进行探测，成绩最大，它绕到月球的背面，第一次拍到了月球背面的照片，使人类第一次看到月球背面的模样。后来，美国的“阿波罗”号拍摄了大量月球照片，图 3-10 的月球右半部是背面，可以看出环形山明显多于正面。

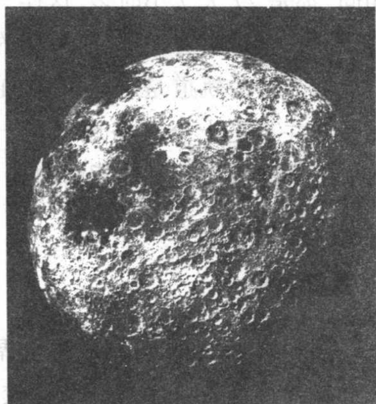


图 3-10 “阿波罗”号拍摄的月球照片，右半边是月球背面

紧跟在前苏联之后，美国从 1961 年到 1965 年先后向月球发射 9 颗“徘徊者”探测器。但是前 6 次都没有成功，探测器变成了在太空中的流浪者。1964 年第 7 颗“徘徊者”探测器携带了 6 台电视摄像机，成功地发回了 4300 多幅月球表面的图像，其中最清晰的几幅是在它很接近月球表面时拍摄的，连月球上小于 1 米直径的月坑和 25 厘米大小的岩石也看得很清楚。最后 2 颗“徘徊者”探测器也很成功，共发回 12000 幅清晰的月球表面照片。1965 年苏联发射“探测器”3 号拍摄到 25 万张月球表面照片，弥补了“月球”3 号没有拍摄过的部分月球表面，得到了一幅完整的月球背面地貌图。

月球背面的探测为什么如此重要？这是因为自古以来，无论是肉眼还是望远镜都没有看到过月球背面的模样。月球是地球的卫星，它在不

停地围绕地球旋转，但它本身也在自转，恰好它的自转周期与公转周期相同，都是27天7小时多，这样一来，就得到了一个奇妙的结果：月球始终以同一半球对着地球，而月球的另一半球却永远背着地球。由于月球绕地球公转的轨道是一个椭圆，它的公转速度有时快些，有时慢些。因此月球并不是十分严格地以同一面朝向地球，在地球上大约可以看到59%的月球表面。月球背面的那41%的表面究竟怎么样，一直是人们关心的一个谜。

2. 月面景观

伽利略于1609年制成的世界上第一架天文望远镜瞄向天空的第一个目标就是月亮。这是一个比较容易看清楚它的表面情况的星球。月球表面最大的特点就是到处都布满了大大小小的环形山，可以说月面是环形山的世界。人们将一些科学家的名字赋予月面环形山。在月球的南极附近有一个叫贝利的环形山，直径有280千米，这是月面上最大的环形山。靠近南极的克拉维环形山，直径240千米，排第二。哥白尼环形山和柏拉图环形山都位于月球赤道附近很醒目的地方，虽然不算最大，也很著名。据统计，仅月球正面直径大于1千米的环形山，大约就有3万多个。如果连那些直径在1米左右的小环形山都算上的话，那么月面环形山的总数大概还要增加近千倍。有的环形山互相重叠在一起，有的大环形山中心低凹的地方还矗立着高高的山峰。有些环形山，还有向四面散射开去的一些明亮的光带，称做辐射纹。位于南半球的第谷环形山的辐射纹最引人注目，长长短短总共12条，最长的达1800千米，蔚为壮观(见图3-11)。1968年美国发射的“勘测者”7号月球探测器，曾经拍到了第谷环形山辐射纹的近距离照片。从照片上可以看出辐射纹上聚集着许多小环形山，这一串串的小环形山就像一串串的珠子。满月前后辐射纹特别明亮，不用望远镜就能看得很清楚，非常美丽。

月球表面为什么会有这么多环形山呢？现在比较流行的看法认为少数大环形山可能起源于火山爆发，而大多数小环形山是由外来的小天体撞击而成的，像小行星、彗星、流星等。由于月球表面没有大气层的保

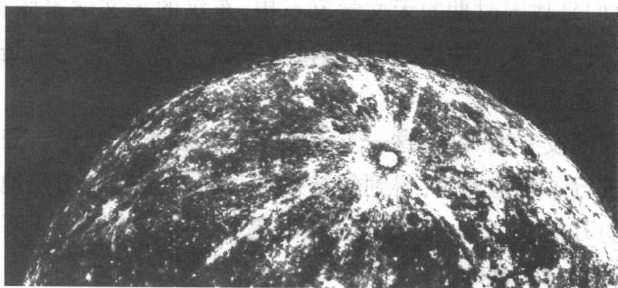


图 3-11　第谷环形山的辐射纹

护，因此许多小的外来天体都会直接砸到月面上，给月面砸出了这么多大大小小的“伤疤”。为了能够证实这种分析是正确的，人们总希望能够亲眼看到月球被撞击的过程。1999 年 11 月 18 日凌晨，当狮子座流星雨来临的时候，美国休斯敦大学的天文学家真的观测到了狮子座流星撞击月球背阴处的闪光现象。

通过望远镜，我们还能看到月面上有一些大平原，这就是我们平时不用望远镜也能看见的月面上的一片片暗黑区域。它们也都有各自的名字，像静海、云海、澄海、雨海、危海、丰富海、风暴洋等等。当年伽利略的望远镜太小了，他看不清楚月面上的黑影子究竟是什么，猜想它们可能是像地球上一样的海洋，于是就叫它们月海，这些月海的名字也就一直沿用下来。

除了环形山和平原之外，月面上也有高大的山脉。雨海旁边的亚平宁山脉，长达 1000 千米，是月面上最大的山脉。在月球南极附近还集中了一些高大的山峰，高达七八千米，最高峰甚至比地球上的最高峰珠穆朗玛峰还高。月球的直径只有地球的 1/4 多一点，竟有如此高的山峰，真令人吃惊。

月球的背面与正面既有相同之处也有不同的地方。相同点在于正面和背面的环形山都很多，不同点是正面的低洼地很多，并且面积很大的低洼地也多，而背面的低洼地很少，绝大部分都是高地。月球背面的环形山也都以著名天文学家和科学家的名字命名，如居里夫人、多普勒、门捷列夫、加加林等等，有 5 座环形山是以我国古代著名科学家的名字

命名的，他们是战国时期的天文学家石申，东汉的天文学家张衡，南北朝的数学家、天文学家祖冲之，元代的科学家郭守敬，第五位则是前面提到的宇航飞行先驱万户。

月球周围没有大气层，这一点天文学家早就下了结论。登上月球的宇航员们进行了实地测量，得到的结果是月面的大气大约是地球海平面大气密度的万亿分之一，比实验室中制造的真空还稀薄，证明了天文学家的结论是完全正确的。

为什么月球没有大气呢？这是由于月球表面引力太小，气体都跑掉了。没有空气，也就不会有水分。因为水会变成水蒸气，然后逃脱月球的引力跑掉。月球上既没有空气又没有水，当然也就没有生命存在了。

大气具有调节温度的作用。月球上没有大气，因此月面上的昼夜温差大得令人害怕。白天，温度最高可达摄氏 130 度，夜晚最低可降到摄氏零下 180 度。大气还具有散射阳光的作用。地球上的天空绚丽多彩，蔚蓝色的天空、彩霞、白云等等，这都是由于有大气层的缘故。而月球上没有大气，月球上的天空永远是黑暗的。太阳看起来比在地球上看更明亮更耀眼。

在月球上看地球，像我们在地球上看月亮一样，也有圆缺变化，但比我们在地球上看到的月亮更大更亮，也更美丽。由于没有大气干扰，在月球上看到的星星不仅比在地球上看到的星星多得多，而且所有的星星都那么稳定，从不闪烁。

3. 探测器月球软着陆

从 1959 年到 1975 年苏联探月活动主要目的是要在月球建立自动科学站。1970 年 9 月发射的“月球”16 号用它携带的小勺挖取月球表面的岩石样本，自动送回地球。虽然只有区区的 100 克，却是苏联第一次获得的月球物质。1970 年 11 月发射的“月球”17 号面目一新，它是一辆无人驾驶的月球车，可以在地球上操纵它在月面行走，在 8 万平方米的区域进行了勘查，对 200 多处的土壤进行了测试。月球车上装备了一台 X 射线望远镜，用它进行了天文观测。“月球”21 号探测器也带上了一辆

月球车，在月球上行走的路程又多了很多。1976 年发射的“月球”24 号是这一系列探测的最后一个。很特别，它携带了一台掘土机，从月球表面下面 1 米深处挖掘了 1 千克岩石样本，顺利地带回到地球。

苏联首先发射人造卫星和首先将宇航员加加林送入太空，创造了两个世界第一。这对美国是一个极大的刺激。在加加林上天仅仅一个月以后，1961 年 5 月 25 日，美国总统肯尼迪亲自出马，在议会发表了著名演说，郑重宣布“阿波罗登月计划”开始实施，他们立志要在 10 年内把人送到月球上去。为了“阿波罗登月计划”顺利进行，美国接连发射了 7 颗“勘测者”号探测器，为宇宙飞船寻找最合适的着陆地点和在月球软着陆的实验。与“勘测者”号探测器软着陆在月球表面进行考察的同时，又把“月球轨道环行器”1 号～5 号发射到围绕月球运行的轨道上，拍摄月球表面地形的详细照片。5 个“月球轨道环行器”在绕月球赤道的轨道上作低空运行，对 40 多个预选的着陆地点进行拍摄，获得 1000 多张照片。从中选出了 10 个最佳着陆地点。

“徘徊者”、“勘测者”和“月球轨道环行器”所获得的有关月球的大量信息，再加上 1965～1966 年“双子星座”载人飞船 10 次飞行获得的丰富经验，为美国“阿波罗登月计划”的实施铺平了道路。

三、震惊世界的“阿波罗”登月

美国宇航局提出的“阿波罗计划”是一项十分激动人心的载人登月活动，把这项活动取名为“阿波罗计划”（或叫“阿波罗工程”）也是极富含意的。阿波罗是希腊神话中的太阳神，也是智慧之神，月亮女神阿尔忒密斯是阿波罗的孪生妹妹，派阿波罗去探月当然是再合适不过了。为了实现这一壮举，美国宇航局动员了 2 万家企业，200 多所大学和 80 多个科研机构的 42 万多人参加了这项庞大工程，历时 11 年，耗资 250 多亿美元。

把人送上月球，在古代是梦想，现代也绝非易事。从几个候选登月方式中最后选中的登月方式是先把飞船发射到环绕月球的轨道上，然后

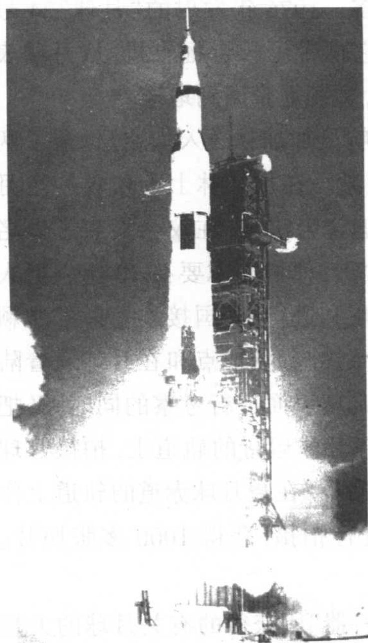


图 3-12　发射“阿波罗”宇宙飞船的“土星”5 号火箭

从飞船上发射登月舱，让登月舱在月球上软着落。“阿波罗”飞船由指令舱、服务舱和登月舱三部分组成。登月舱里携带有燃料，这是供登月考察结束后飞离月面时起飞用的。还有 4 只可伸长的底脚，起到发射架的作用。

巨型运载火箭“土星”5 号承担将“阿波罗”飞船送上月球的光荣使命(图 3-12)。“土星”5 号为三级液体火箭，全长 110.6 米，相当于 36 层大楼那么高，直径 10 米，起飞重量 2840 吨。“土星”5 号是美国最大的运载火箭，它能把 100 吨重的卫星送上绕地球轨道，或者是把 50 吨重的飞船送上月球。它是由著名火箭专家冯·布劳恩为这次登月活动专门设计的。

为了实现“阿波罗登月计划”，整整地做了 8 年的准备工作和周密的飞行试验：发射“阿波罗”1 号～6 号进行不载人的近地轨道飞行试验；发射“阿波罗”7 号～9 号进行载人模拟登月飞行；发射“阿波罗”10 号到达距月面 15 千米处进行载人登月预演。一切试验都成功后，才在 1969 年 7 月 16 日将载人的阿波罗 11 号飞船成功地送上了月球。

这天清晨 9 点 32 分，美国佛罗里达州卡那维拉尔角的肯尼迪航天中心周围已经门庭若市，聚集在那里的心情激动的新闻记者和围观群众不下数十万，他们在焦急地等待着观看“阿波罗”11 号从这里起飞。随着震耳欲聋的一声巨响，载着“阿波罗”11 号飞船的“土星”5 号火箭腾空而起，从它尾部喷出来的巨大火舌映红了整个天空。

飞船的 3 名宇航员是指令长阿姆斯特朗，指令舱驾驶员考林斯和登月舱驾驶员奥尔德林。19 日上午飞船进入月球的引力范围，下午顺利进

入环绕月球的轨道。20 日中午，指令长阿姆斯特朗和登月舱驾驶员奥尔德林进入登月舱，离开指令舱向着人类自古就梦想身临其境的月宫飞奔而去，考林斯则驾驶着指令舱继续围绕月球飞行。

飞到距离月面 2.3 千米的时候，登月舱调整了姿势，把它的四只脚朝向月球准备着陆，着陆地点选在静海。当登月舱距离月面仅剩 150 米的时候，自动操作停止，改为手控下降。7 月 20 日格林尼治时间 20 点 17 分，登月舱在静海西南角一个理想的着陆点平安降落。休息了几个小时以后，指令长阿姆斯特朗爬出了舱门，小心翼翼地走下扶梯，将右脚使劲踏到了月面上，留下一个深深的脚印(图 3-13)。这时是 1969 年 7 月 21 日上午 11 点 56 分 20 秒，值得人们纪念的时刻，人类第一次登上月球。

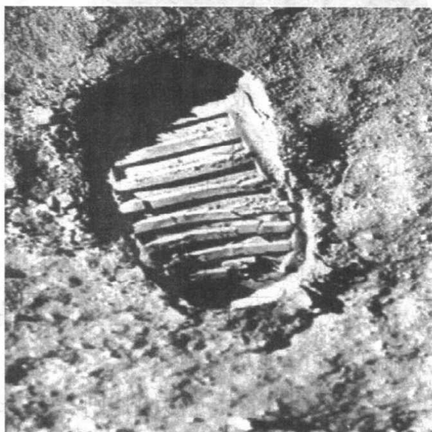


图 3-13　人类踏上月球的第一个脚印

宇航员站在月球上举目远眺，月球表面布满灰尘，万籁俱寂，一片荒凉。没有水也没有空气，更没有任何生物。作为人类派往月球的第一批使者，阿姆斯特朗和奥尔德林(图 3-14)没有被激动的心情所陶醉，也没有被这陌生的世界所惊呆，他们没有忘记自己担负的考察任务：采集土壤样品、岩石样品，拍摄照片，用铝箔捕捉太阳风质点，等等。然后他们又在月球表面安装了一台用来记录月球内部震动的月震仪，一台用来精

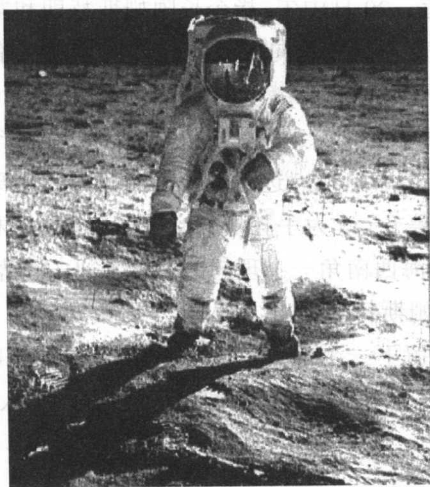


图 3-14 “阿波罗”11 号宇航员奥尔德林在月面的留影

确测量月地距离的激光反射器。最后,他们把一块金属纪念牌插在月球的土地上,纪念牌上刻着一行大字:“公元 1969 年 7 月,来自地球上的人首次登上月球,我们是全人类的代表,我们为和平而来。”2 个半小时完成了全部任务。

下午 1 点 45 分,返回地球的时间到了,他们进入登月舱,点燃了登月舱上携带的小型火箭,从月球上起飞,与一直围绕着月球运转的指令舱会合以后,调整了航向,朝着地球飞奔而来。

经过两天多的飞行,载着三名宇航员的“阿波罗”指令舱于 24 日下午 0 点 50 分平安溅落在中部太平洋上,一艘专程赶来的航空母舰把它们打捞上来接上岸,美国总统尼克松亲自参加了欢迎他们胜利归来的盛大仪式。

“阿波罗”11 号的登月考察取得了完全成功。之后,美国紧跟着又发射了“阿波罗”12 号至 17 号,这 6 艘飞船中除了“阿波罗”13 号由于意外事故未能登上月球之外,其余 5 艘全部登月成功。这 5 艘登上月球的“阿波罗”飞船,每艘都载有 3 名宇航员,每次都是一名宇航员留在指令舱里绕月球飞行,另外两名踏上月球的土地,完成了他们所担负的考察

项目。5 艘飞船选择的着陆点各不相同。“阿波罗”12 号登月舱准确地着陆在风暴洋中预定的位置上。这次的着陆点与美国的“勘测者号”探测器 1967 年 4 月 19 日在月面的软着陆点相隔仅仅 180 米。两名宇航员在月面上建立了一座价值 2500 万美元的核动力实验站。以后陆续登月的“阿波罗”14～17 号的宇航员们每次都在月面上建立一座这样的实验站，因此，后来月球上共有五座核动力实验站。实验站里包含有六种科学仪器，有磁力计、离子检测器、月球大气检测器、太阳风分光仪、尘埃检测器和月震仪。

“阿波罗”13 号把着陆点选在了弗拉·摩洛环形山北侧的高地。它所携带的任务是要用“土星”5 号火箭的第三级残骸轰击月球表面，造成一次较大规模的月震。再用电动钻头在月面挖一个深约 3 米的坑，采集一些岩石样品带回地球。由于“阿波罗”13 号登月未成，“阿波罗”14 号担负起到弗拉·摩洛高地北面的丘陵地带去采集月球上最古老的岩石标本的任务。“阿波罗”15 号着陆点选在雨海东南的亚平宁山脉和哈利德峡谷之间，这是以前尚未涉猎过的地方，这里的山脉绵延，沟壑纵横。两名宇航员驾驶“遨游”1 号月球车（图 3-15）在月面上跑了三次，行程 28 千米，采集到月球形成初期的结晶岩。“阿波罗”15 号在环绕月球的轨道上飞行时，成功地发射了一颗环绕月球运行的科学卫星，这颗月球卫星可



图 3-15 “阿波罗”月球车

以测量月球辐射、太阳风、月球重力和磁场等数据,并把测量结果送回地球。“阿波罗”16号的着陆点是在凯伊里高地。宇航员从永远都照不到太阳光的地带,采集了土壤和岩石样品。“阿波罗”16号在返回地球的途中,也向月球发射了一颗绕月运行的小卫星,并且指令舱驾驶员马丁利走出飞船,亲身体验了太空漫步的感受。“阿波罗”17号是“阿波罗计划”中拜访月球的最后一位使者。登月舱在静海边缘的“金牛-罗峡谷”地区着陆。这里的高山环绕、地势复杂,怪石林立,环形山密密麻麻。登月舱驾驶员施密特是一位地质学家,有意识地是要利用他的专业知识对月球进行深入考察。他情不自禁地向休斯敦飞行指挥中心报告说,这里真是“地质学家的乐园”。

1972年12月19日下午2点23分,告别地球12天13小时51分钟的“阿波罗”17号安全返回地球。至此,整个“阿波罗”计划宣告胜利结束。12名宇航员先后6次登上月球,累计月面停留时间302小时20分钟,月面探测80小时,行程90.6千米,带回月球土壤和岩石样品381千克。这是人类月球探测史上具有划时代意义的一项成就。它不仅使我们对月球的认识产生了巨大的飞跃,而且为我们开发利用月球资源提供了十分宝贵的第一手资料。在人类的航天史上写下了最壮丽辉煌的一个篇章。

四、我国月球探测的“嫦娥工程”

自古以来,我国人民就梦想飞到月球上去饱览月面风光,由此才创造出“嫦娥奔月”这样美丽动人的神话故事,借此来抒发他们这一远大的情怀。如今,古人这一美好愿望马上就要变为现实了。用“嫦娥”冠名的中国月球探测工程目前正在紧锣密鼓地进行着。中国国家航天局已于2003年正式宣布,“嫦娥”1号——中国首次卫星探月活动力争在今后三年时间内实现。这是中国航天事业向宇宙深空探测迈出的可喜的一大步,它必将像载人航天一样受到人们格外的关注。“嫦娥”1号月球探测卫星重达两吨多,预定要用长征三号甲运载火箭发射升空。在卫星和运

载火箭分离后，将先绕地球运行 3～4 圈，逐步加速以达到地—月转移轨道的入口速度，然后卫星沿大椭圆轨道进入围绕月球运行的轨道(图 3-16)。卫星将携带 CCD 立体相机、成像光谱仪、激光高度计、微波探测仪、太阳高能粒子探测器、X/γ 射线谱仪和低能离子探测器等。

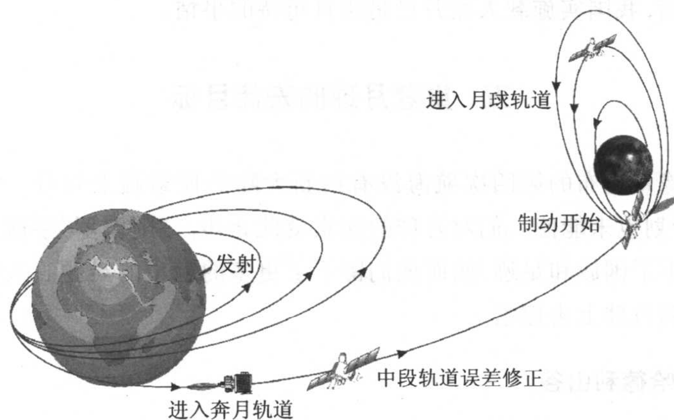


图 3-16 “嫦娥”1 号月球探测卫星轨道示意图

“嫦娥”1 号担负的科学任务主要有以下四大项：获取月球表面三维立体影像，精细划分月球表面的基本构造和地貌单元，为下一步的月球软着陆区选址和为远期的月球基地位置优选提供基础资料。勘察月球表面钛、铁等 14 种有开发价值的元素的含量和分布，对月球矿产资源的开发前景作出评估。利用微波辐射技术，探测月球土壤的厚度，并且估算理想核能源氦-3 的资源分布和含量。进一步探测地球—月球之间的空间环境。

“嫦娥工程”的近期规划分为三个阶段：第一阶段是“绕”，现已定出 2006 年 12 月发射“嫦娥”1 号的计划；第二阶段是“落”，大约 2010 年完成；第三阶段是“回”，大约 2015 年完成。“绕”是发射我国第一颗围绕月球飞行的探测卫星，即“嫦娥”1 号，对月球进行整体的、全面的、综合性的探测，以获得月球的三维立体图像等第一手资料，更深入地认识我们的月球。“落”是向月球发射软着陆器，并携带月球车在月球表面巡视勘察，获取更多的月表信息。“回”是进一步向月球发射携带小型采样返回

舱的软着陆器，采集重要的月球样品后返回地球。

在近期规划的绕、落、回三个阶段全部完成之后，“嫦娥工程”的下一个目标是实施振奋人心的载人登月探测。我国已经具有载人航天的能力，再加上近期三个阶段不载人探月活动所积累的宝贵的经验和技术，我们相信，我国实施载人登月已是指日可待的事情。

五、重登月球的宏伟目标

就像哥伦布的第四次航海没有给新大陆的探索画上句号一样，“阿波罗”计划也未能使人们对月球的探索就此止步。“阿波罗”宇航员在月球上留下了国旗和足迹，然而他们留下了更多的棘手的难题。人类应当重新回到月球上去探索。

1. 重回哈德利山谷

许多科学家想再回到“阿波罗”15号着陆点哈德利山谷着重考察那里的雨海。这是一个直径为700千米，深20千米的盆地，它可能是40亿年之前一颗直径只有几十米的小行星撞击月球形成的。科学家们估计雨海边缘的横断面能够揭示雨海形成之前月壳的垂直结构。

一些科学家已经制定了一个环绕雨海的4000千米的考察计划。这个计划要对29个关键地点下面的岩石进行取样，要寻找雨海形成前的火山岩，这种岩石中可能含有丰富的钾和地球上的稀有元素。还希望在那里找到掩盖在熔岩流下面或撞击后溅射出去的古老的月球土壤，它们将为太阳系形成初期的活动情况提供有力的证据。

对哈德利山谷的考察还有助于揭示月球最近火山活动的一些细节，在那里还可以绘制相当大范围内的环形山图，并进一步推断在月球的历史上是什么天体撞击了它。

2. 建立月基天文台

一些科学家希望能在月球上建起大型天文台，即月基天文台，安装

在那里的望远镜则称为月基望远镜。月球具有十分优越的天文观测条件。

月球上没有大气,在那里可以对天体作全波段观测。由于月球的重力只有地球的六分之一,而且月球上永远没有风,因此在月球上建造巨型望远镜及其观测室要比在地球上建更方便更经济。月球的地质活动比地球平稳得多,月震活动只有地震活动的一亿分之一,对望远镜的观测影响很小,尤其对基线很长的光学、红外和射电干涉系统,更是至关重要的环境条件。地球自转较快,地球上的昼夜交替为 24 小时,使人们无法长时间地跟踪观测同一个天体,月球的自转周期与公转周期相同,月球上的每个白天和黑夜几乎都有地球上的两周长,因此在月球上可以连续不断地对同一天体进行 300 多个小时的观测。与失重状态下的空间望远镜相比,月基望远镜是建在月球这个直径为 3476 千米的巨大而稳定的"观测平台"上。技术人员到现场安装、维修望远镜以及解决它们的跟踪、指向等问题,都比空间望远镜容易得多,也经济得多。

3. 月球开发的美好前景

地球上有限的煤、石油等资源总有枯竭的一天,其它能源的开发成为人类社会发展必须加快解决的问题。人们对目前地球上的核电站虽然忧心忡忡,害怕发生像切尔诺贝利那样的事故,但是仍然在不断建设核电站。这种由原子核的裂变产生能量的方式有很强的放射性污染,要加以特殊的防护。在太阳上发生的由氢核聚变为氦核产生能量的方式虽没有放射性污染,但发生这样的聚变需要几百万度的高温,目前在地球实验室还做不到。但是,有一种聚变的核反应不需要高温,放射性污染极小,那就是由氢的同位素氘和氦的同位素氦-3 的聚变反应。氘($^{2}_{1}H$)比氢的原子核多了一个中子,氦-3($^{3}_{2}He$)则比氦核少了一个中子。在地球上的海水中蕴藏着不少氘,但是没有氦-3。月球上却有不少氦-3 元素。据估计,在月球上至少有 71.5 万吨氦-3。虽然月球上还有许多矿藏很丰富,但也许只有氦-3 是值得开采的。

4. 在月球上建设人类能居住的城市

地球上的人口越来越多,不过还不至于拥挤到没有地方居住。但在月球上建立天文学、高能物理学、生物学的研究基地,探索外层空间的中继站,旅游项目等,都具有很现实的吸引力。这些也都需要解决人的居住条件问题。

现代高科技的发展提供了人类开发月球的可行性。人们原来以为月球上没有水,也没有空气,人们生活所必需的一切都必须从地球上运输到月球上,这样的耗费实在太大了。美国 1994 年发射的绕月飞行的“克莱门汀”号飞船发回的信息说明月球南极附近的一个盆地中可能有冰存在。有冰就是有水。所以这个消息在世界上引起很大轰动。为了证实月球上是否真的有水存在,美国于 1998 年 1 月专门发射了一颗“月球勘探者”号探测器。它发回的最新数据表明,月球两极存在着冰冻状态的水,估计有 60 亿吨,可供 4 万人生活 100 年。如果月球上真的有水,不仅能解决人在月球上的生活用水,发展月球农业,还可以用水来制造氢和氧。设想中的月球城将由一个坚固的外罩来防护流星、陨石的袭击,来调节太阳光线入射的多寡使月球城中保持一定的温度(图 3-17)。

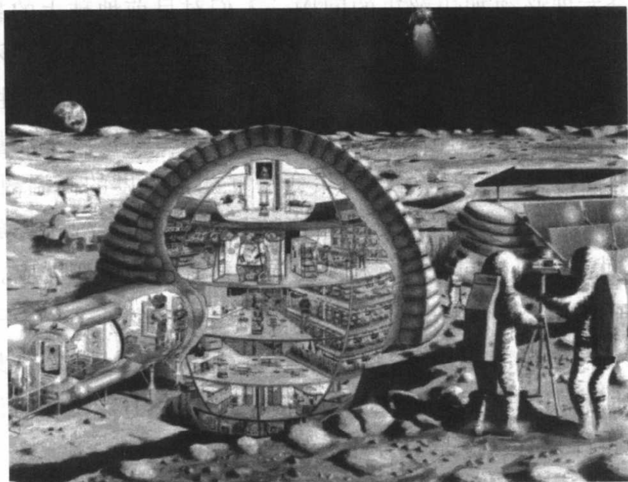


图 3-17 未来的月球城市设想图

美国、日本、欧洲的航天部门纷纷提出了自己的探月计划和建立月球基地的设想，我国的探月计划也已付诸实施。早期探月是开拓性的探索，并且美苏出于政治需要而相互竞争。而当前的探月计划虽然仍有竞争，但合作的气氛很浓。人类可望在 2015 年左右重返月球，用 8～10 年建成初级基地，逐步发展月球工业、农业，再用 10 年建成永久性的月球基地。到那时，人类到月球上去旅行也会美梦成真了。

思考和复习题：

1. 试评述明朝的万户乘坐用火箭捆绑的“飞天椅”升空事件的意义。
2. 简述我国宇航科学的发展。
3. 简述月球探测的主要结果。
4. 试评述“阿波罗计划”实现人类登月的意义。
5. 你对人类开发月球的前景有什么看法?

第四讲

行星的空间探测

自从1957年人类历史上第一颗人造卫星进入太空以后，科学家们就开始酝酿对太阳系中的行星进行空间探测。在九大行星当中，火星是与地球最相似的行星，关于火星上有没有生命这个问题已经困惑了人类几个世纪。因此对火星的探测成为所有行星探测中的重中之重。金星是距离我们最近的行星，曾被看做是与地球非常相似的孪生姐妹，也是人们渴望迅速揭开其神秘面纱的一个行星。木星和土星是九大行星中个头最大的两个，它们都是处于液体状态。木星空间探测最引人入胜的课题除了进一步揭开大红斑的奥秘和60个卫星状态之外，就是要探求它自身具有比较强的辐射的来源。土星这个密度最小的庞然大物所拥有的美丽光环一直是天文学家关注的焦点。天王星和海王星都比地球大，卫星也比较多。由于离地球比较遥远，地面上的大型望远镜很难看清楚它们及其卫星的细节，空间探测弥补了这个缺陷。目前惟一没有探测过的行星是太阳系中最遥远、最暗淡、最小个的冥王星。行星的空间探测是人类研究天文学方法上的一次巨大飞跃，科学家采用发射宇宙飞船到它们的附近去拍摄清晰的照片，或发射探测器在行星表面软着陆进行实地探测。在21世纪中将有更多的宇宙飞船探测行星，把宇航员送

上火星的宏伟理想也可能在20～30年内付诸实现。

一、火星的空间探测

我们生活的地球是围绕太阳转动的一颗行星，公转的轨道是一个椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。和地球一起围绕着太阳转动的还有八个大行星，统称九大行星。这九大行星按照距离太阳的远近，从近到远依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星(见彩图4)。火星和木星之间还有一大批小行星。太阳和围绕它转动的这些大大小小的行星、卫星和彗星组成了一个非常和谐、美妙的天体系统，也就是我们的太阳系(图4-1)。太阳是九大行星的家长，因为太阳的质量非常大，占整个太阳系所有天体总质量的99%以上，巨大质量产生的巨大吸引力把九大行星牢牢地维系在自己的周围，永不离散。

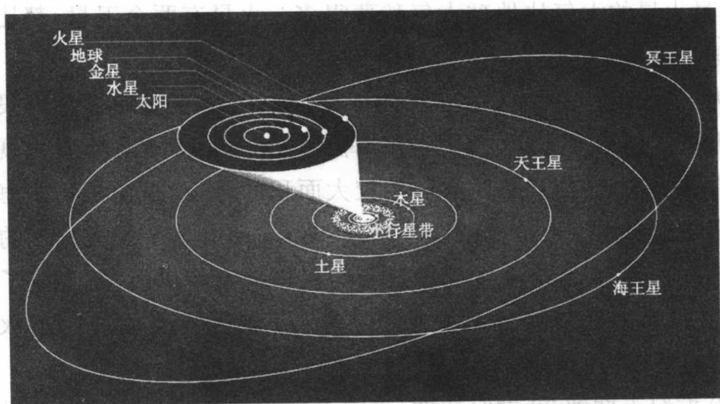


图4-1 太阳系九大行星运行轨道示意图

红色的火星自古以来就备受人们的关注。我国古代因其“荧荧如火”而称它为“荧惑”。火星的轨道在地球之外，是地球的近邻。20世纪60年代末期人类的足迹已经踏上了月球，人类在登上月球之后，所选择的下一个目标就是火星。金星离地球比火星还要近，为什么不选择金星，而舍近求远首先选择火星呢？

1. 火星是与地球最相似的行星

火星距离地球很近,又很亮,最亮时可达 -2.9 等。火星与地球有许多相似之处,就像一颗小型地球。火星的直径 6796 千米,约为地球的 1/2。距太阳 2.28 亿千米,所接收到的太阳能量自然比地球要少一些,火星表面的平均温度比地球表面的平均温度大约低 30℃。地球的自转周期是 23 小时 56 分,公转周期是 365 日。火星的自转周期为 24 小时 27 分,公转周期为 687 日。火星的一天与地球的一天很接近,火星上的一年大约等于地球的两年。地球上之所以有四季的变化,是因为地球的自转轴与其公转轨道面的法线并不重合,而是有一个 23°27′的倾角。火星也同样有一个 23°59′的倾角,只有半度之差,因此火星上也有比较明显的四季的变化。火星的两极都有白色的极冠,极冠的面积随季节的变化而增大或缩小,就像地球上南北两极的积雪和冰山一样。火星也有大气层,不过火星的大气比地球大气稀薄得多。火星有两个卫星,都比我们的月球小得多。

为了能够找到火星存在生命的证据,天文学家的望远镜始终没有离开过火星。1877 年夏天,意大利布雷拉天文台台长斯基帕雷里发现火星表面有一些狭窄的暗线,还有一些较大面积的暗区,很像是一些海峡连通着宽阔的海洋。于是他把这些暗线叫做 canali,这个意大利词的意思为“沟渠,水道”。但这个发现经过新闻媒体的宣传以后,就变成了火星上有运河,因为英文字 canal 的意思是由人工挖掘的运河。于是,火星上有人的消息很快便轰动了全球。

19 世纪末期到 20 世纪初期,美国天文学家洛韦尔通过对火星长达十五年的观测和研究,画出火星上面的 500 多条“运河”。他认为火星人确实存在,指出:“火星表面缺水,智慧生命为了生存,就必须努力发展水利设施,这就是火星上有许多运河的原因。”后来,人们用更大的望远镜观测,发现所谓的“火星运河”是由许多孤立的形状不规则的暗斑所组成,而不是所谓的运河。可这并没有使人们对火星上有生命存在的看法彻底改变。到了 20 世纪 50 年代,苏联一位著名的天文学家甚至认为火

星上虽然现在已经没有高级生物存在了，但是二三十亿年以前是有的，火星的两个卫星就是他们发射的人造火星卫星。这位天文学家的观点吸引了许多人的注意，因为大家都希望能在火星上找到生命。

2. “水手”号火星大探秘

虽然天文学家已经证实火星没有人工兴造的运河，它的卫星也不是人造的，然而火星上究竟有没有任何形式的生命存在这个最基本的问题仍然是科学家们关注的焦点。尽管人们建造的地面望远镜已经越来越大了，但仍然不能将火星表面的细节看清楚。求助于空间技术进行空间探测成为迫切的任务。

从 20 世纪 60 年代初期开始，美国和苏联开始陆续向金星和火星发射空间探测器。其中以美国所发射的四个系列的火星探测器（“水手”、“海盗”、“探路者”和“环球勘测者”、“机遇”和“勇气”）所获得的资料最多。对火星的了解也就越来越全面了。

美国宇航局“水手”系列探测器是第一批，1964 年 11 月发射的“水手”4 号在 1965 年 7 月首先飞达火星附近，距火星最近时为 9200 千米。探测发现：火星没有磁场；有像月球表面那样的环形山；大气稀薄密度不足地球大气的 1%，主要成分是二氧化碳，其次还有一些氩。火星上的条件显然比地球上恶劣得多。1969 年美国连续向火星成功发射“水手”6 号和 7 号，携带了测定火星大气成分和温度的仪器，测得的火星表面温度比原来人们的预测值还要低，在火星大气中也找不到水蒸气的踪影。1971 年“水手”9 号到达火星之际，正遇火星上出现大规模的尘暴，到处是黄沙飞舞，遮天蔽日，迷迷蒙蒙。这时，苏联的“火星”2 号和 3 号两个探测器也来到火星附近，它们携带了性能很优良的照相设备，但是火星尘暴使这两个探测器的任务未能完成。“水手”9 号不同于其它探测器，它不是从火星旁边飞过之后就一去不复返了，而是进入环绕火星的轨道，成为环绕火星运行的人造卫星。它与火星的最近距离达到了 1395 千米。几个月后，火星尘暴平息了，它获得了比其它“水手”号更多、更精细的资料。

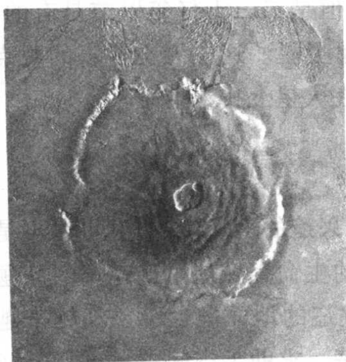


图 4-2 利用“海盗”号的多幅照片拼接而成的奥林匹斯火山

几个“水手”拍摄的火星照片都显示火星表面到处是沙漠，根本没有运河。从地面望远镜看到的火星表面的一些暗斑并非人们所想像的海洋或湖泊。“水手”9 号探明，原来以为是一座积雪覆盖的奥林匹斯山却一点雪也没有，而是一座高 24 千米的太阳系中最大的火山(图 4-2)。火山口直径 80 千米。估计它最近的一次喷发是在 2500 万年以前。火星的赤道地区有一条巨大的峡谷，全长 3000 多千米，宽 200 多千米，深六七千米，因为是“水手”9 号发现的，被命名为“水手谷”。火星表面还有许多类似于地球上河流一样的地貌，一条条一道道蜿蜒曲折，宽窄不一，但是里面并没有水。“水手”9 号还测定了火星两个卫星的形状和大小，照片显示出的卫星形状极不规则，像是两个被虫子咬过的大土豆，上面还有许多被撞击而生成的坑。

3. “海盗”探寻火星生命的蛛丝马迹

1975 年，美国宇航局又相继发射了两颗火星探测器“海盗”1 号和“海盗”2 号。“海盗”1 号于 1976 年 6 月到达火星，成为围绕火星运行的人造卫星，它携带的着陆舱于一个月后在火星上着陆成功。“海盗”2 号的着陆舱于 1976 年 9 月在火星表面着陆成功(见彩图 6)。它们的主要使命就是探测火星上有没有任何形式的生命存在。

每个着陆器上都携带着精密的仪器，分别用来探测火星表面温度，分析土壤成分、大气成分，测量风速，探测火星地震等等，当然还有最重要的任务，就是寻找火星生命的迹象。它们在火星表面看到的景象是一派荒凉。一望无际的沙漠中到处是一块块大大小小的石头。石头的颜色与地球上的石头颜色很不同，是一种很独特的铁锈红色。经过测试发现，火星土壤由硅酸盐组成，与地球相似，但含铁量很高，才使得火星岩

石呈红色。

与以前的探测结果不同的是“海盗”号发现火星大气中还是有极少的水蒸气，比地球上最干旱的撒哈拉沙漠地区的水分还要少。为了寻找火星生命的迹象，“海盗”号着陆器挖掘了火星表面的土壤，进行了多种能够证明土壤中含有生命的实验，但是没有一种实验能得出火星上有生命的足够证据。“海盗”号着陆器携带的仪器又对火星土壤样品进行了是否含有有机化合物的分析测试，没有发现任何有机分子的存在。有机分子是生命的基础，没有有机分子，就谈不上生命问题了。

“海盗”号着陆器不会走动，它们在火星表面采集样品的范围仅限于四周大约 10 平方米之内。这使科学家们想到可能其它地区还会有生命的迹象存在，把关注的焦点又转移到了火星的南北两个极冠。他们猜想，火星极冠中可能既包含了大量的干冰，又包含着大量的水冰，从这些冻结的水中可能会找到火星生命的踪影。

4. “探路者”和“环球勘测者”探测火星

1996 年 11 月和 12 月美国相继发射了两颗火星探测器——“环球勘测者”号和“探路者”号。前者于 1997 年 9 月，后者于 1997 年 7 月抵达火星。“探路者”号是后发射的，但由于走了一条捷径，却先期到达火星。“探路者”号由轨道飞行器和着陆器两部分组成。着陆器上除携带了摄像机、360°全景照相机等仪器之外，还携带了一个名叫“索杰纳”的机器人，也称为“索杰纳”号火星车。“索杰纳”在火星表面的行动异常谨慎，1 分钟只前进 60 厘米，在预定的 1 个星期之内大约行走了 100 米左右。

“探路者”和“索杰纳”在火星表面拍摄了大量全景照片和特写照片(图 4-3，4-4)。还做了许多关系到火星有无生命问题的科学实验，例如收集和测定火星土壤和岩石碎块中的原始微生物化石，测定土壤和岩石的化学成分，利用探棒插入土壤测定土壤深部的化学成分与含水量，等等。其中最重要的一个结果是推断在 30 亿～10 亿年前，火星表面确实曾经有过洪水的活动，因此也形成了火星表面大量的河谷遗迹。

火星“环球勘测者”进入环绕火星的椭圆轨道之后，对火星的地貌、



图 4-3 “探路者”号在火星表面拍摄的 360°全景照片

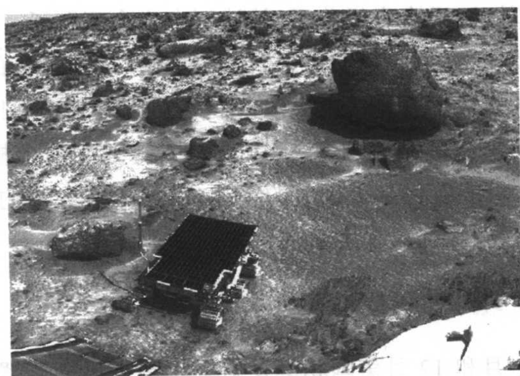


图 4-4 “索杰纳”在火星表面工作的情形

大气、矿藏以及磁场等情况进行了测量。它发现火星并不是完全没有磁场，而是有一个不易被探测到的微弱磁场。“环球勘测者”另一项更引人注目的成果是得到了火星表面 2700 万个点的高度值，由此绘制出一幅火星的三维图像：一个非常漂亮的火星立体模型。与立体地球仪相类似，火星表面的高山、平原、峡谷、盆地等所有地形地貌都是按照实际高度的同一比例绘制出来的，为了更逼真和醒目，采用不同的颜色表示不同的高度，用红和白的颜色代表比较高的区域，而用绿和蓝色表示低洼的地区，这样，火星表面的地貌特征就形象而生动地呈现在我们的面前了(见彩图 8)。科学家认为，目前人类对火星表面了解的详实程度甚至超过了对地球许多大陆性区域的了解。

面对火星的三维图像，我们发现火星表面有许多十分突出的特征。火星的北半球不仅相当平滑，而且明显地比南半球低洼。南半球平均比

北半球高 5 千米，上面密密麻麻地分布着许多环形山。靠南极的地方，还有一个巨大的盆地。南北半球之间存在的高度差形成了从南半球到北半球的倾斜，导致了火星历史上宏观的水流方向基本上都是从南向北的。火星表面 75％的河床都分布在北半球的低洼地里。但是，这些河床早已全部干枯了。火星上的水都跑到哪里去了呢？

从三维图像可以看出，火星北极就像“戴”着一顶硕大的用冰做成的帽子(图 4-5)。这顶大帽子方圆大约有 1200 千米，最厚的地方大约 3 千米。那上面还有 1 千米深的山谷。测量结果还表明，构成火星北极冰帽的水仅仅只有地球南极冰层的 4％。南极冠区和北极冠区在轮廓上有很相似的地方。可以认为南极冠区也有大量的水冰存在。



图 4-5　火星三维地形之北极冰帽

5. “勇气”号、“机遇”号和“火星快车”再探火星

到了 2003 年，火星探测又掀起以找水为核心的探测高潮。这是火星上现在或历史上有没有生命存在的关键。2001 年美国的“奥德赛”绕火星飞行，不仅探测到火星表面在历史上有水的证据，还发现火星南极有大量氢分子存在，间接地表明那里有冰冻水的存在。

这一高潮中，有欧洲空间局于 2003 年 6 月 2 日发射的绕火星飞行的“火星快车”。美国 2003 年 6 月 10 日和 7 月 7 日发射的“勇气”号和“机遇”号火星漫游车，并分别于 2004 年 1 月 4 日和 26 日到达火星表面。

这一对耗资8.2亿美元的火星探测器是自2003年2月1日“哥伦比亚”号失事以来美国宇航局的最大的太空探测项目。也是继“阿波罗”号飞船登月以来人类又一项伟大的科学探索，第一次有两台火星车在火星上工作。

这两台火星车集尖端高科技于一身。它们实际上是2名聪明能干的“地质工作者”机器人，并携带了诸如全景相机、显微成像仪、小型放热光谱仪、阿尔法粒子X射线光谱仪及岩石模具等先进的科学仪器（图4-6）。

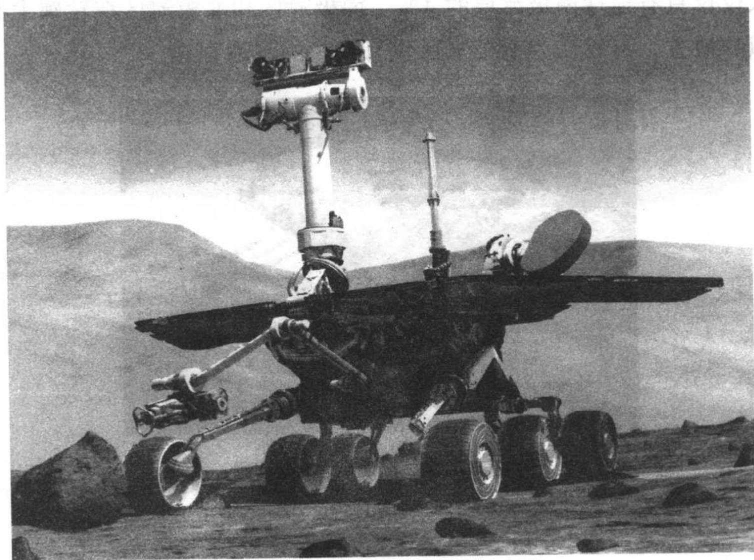


图4-6 “勇气”号火星车

它们位于火星不同的半球，“勇气”号在火星赤道以南15度的古谢夫环形山，“机遇”号在梅里迪亚尼平原区域附近。

总共有四个主要探测课题：寻找是否有水存在；了解火星的气候；勘查火星的地质情况；为载人火星探测做准备。“勇气”号在登陆成功后，很快就由红外辐射仪测量了登陆处的气温，还发现一种“泥浆状的物质”，尚不能确定是什么，只是猜想可能是从火星地底深处蒸发出来的潮湿物质

留下来的。大量的探测则是对岩石进行化验,寻找火星水的踪迹。

"机遇"号在进入名为"持久"的陨石坑后,首先探测了陨石坑内上部的岩层,发现岩石中富含硫酸盐。火星车在更下面的两个岩层中发现了硫酸盐以及球状凝结物。这些都是岩石在潮湿环境下形成的迹象。"机遇"号的新发现让科学家们感到有点意外。原来认为在"持久"陨石坑深层只能找到玄武岩,可是出乎意料的是也发现了盐。意味着这里可能有水,至少是曾经有过水。"机遇"号不久前对"小鹰"陨石坑内的岩层的探测结果也发现类似的情况。

"勇气"号的新发现也令科学家惊喜,"勇气"号在一名为"哥伦比亚"的小山脚下发现岩石中含有赤铁矿。而在以前的对此处的古谢夫环形山为期 5 个多月的探测中,却没有在岩石中发现赤铁矿。按照地球上的赤铁矿形成都与水有关的环境特点来推断,可以认为火星上曾有过水。当然,火山作用也可能会形成这种矿物。因此还不能下结论。

这 2 台火星车接受远在地球的科学家的指挥,变更观测目标,可以在火星表明行进几千米。虽然,在它们登上火星表面以后曾经发生很大的故障,几乎要了命。但是,火星车既可以接受地面控制人员的指挥,又具有自检测和调整的能力,终于转危为安,逐渐恢复正常工作,人们正期待它们获得更多的探测成就。

就在"勇气"号伴随着"机遇"号在火星表面成功着陆的同一时间段,即 2004 年 1 月份,欧洲空间局的"火星快车"也抵达火星附近。虽然它所携带的"猎兔犬"2 号着陆器未能成功实现使命,但它所携带的 7 种科学仪器在围绕火星的轨道上对火星的大气、地貌以及地下岩层分布进行遥感探测,取得了许多珍贵的科学成果。最令我们关注的是,它的高分辨率立体相机(HRSC)拍摄的火星地貌图中,一些高地、悬崖和峡谷有明显被水流腐蚀和冲刷过的痕迹。这为火星历史上曾经有过水的论断增加了新的证据(见彩图 7)。

美国著名的《科学》期刊评出的 2004 年十大科技突破的首条就是:美国"勇气"号和"机遇"号火星车对火星的探测,发现火星曾经温暖和湿润,有可能在数十亿年前曾支持生命的进程。

二、雄心勃勃的登陆火星探测计划

20 世纪 60 年代末期，人类实现了登月的美好梦想。21 世纪到来了，美国、俄罗斯、欧洲和日本等都有比较大的计划。最为宏伟的还是属于美国载人探测火星的计划。美国宇航局计划将在 2008 年向火星发射一系列新的无人飞船，成功后就将着手实施向火星发射载人飞船的计划，实现人类在火星着落、甚至在火星定居的千年梦想。今后 20～30 年内，宇航员有可能踏上火星。

1. 火星直航方案

1989 年美国提出“太空探测倡议”，计划 2009 年重返月球，2019 年实现人在火星上着陆。美国宇航局根据这个计划，提出的火星探测计划“90 天报告”，计划中的火星飞船有 1000 吨，可乘坐 7 至 8 名航天员，飞行 7 个多月到达火星。在火星上停留 1 年半的时间，所有所需的飞船用的燃料和宇航员的食品、水和氧气都要由飞船携带或另派飞船运送。因此，费用特别高。4500 亿美元的经费预算使这一庞大的计划流产。

后来提出的“火星直航”方案，只需 200～300 亿美元，这样的花费使这一计划的实现成为可能。所谓直航是指宇航员乘坐火星飞船从地球直飞火星，返回地球时也同样是直飞。必需的物资和宇航员返回地球的飞行器则由另一艘无人飞船先期发出。为了在火星上制造必需的物资，飞船将携带 6 吨氢，1 台空气压缩机，1 套自动化的化学处理设备和 1 台安放在大型漫游车上的 100 千瓦的核反应堆。这样，原料、电力和化工生产设备都有了。整个流程是由氢和火星上的大气发生反应产生水和甲烷，水经电解又产生氧和氢，氧与甲烷一起可作为火箭推进剂，氢则由化学处理设备生产出更多的水和甲烷。用这套设备还可以分解火星大气中的二氧化碳获得氧气。这样，返回地球所需的火箭推进剂和宇航员在火星期间所需要的水和氧气就都有了。宇航员将乘坐 1 辆小型漫游车进行科学考察。4 名宇航员将在火星上生活漫长的 1 年半。

宇航局提出的最后方案是耗资巨大的4500亿美元的“90天报告”方案和比较便宜的“火星直航”方案的折衷结果，取名为“参考任务”，经费则改为550亿美元。经费多了，意味着可以多带些物资，多发送几次飞船，以减少在火星上生产各种物资的压力。

2. 火星飞船的航线

火星飞船的发射需要选择合适的飞行路线。火星飞船以大于11.2千米/秒的速度从地球出发，脱离地球的引力后，这时飞船与地球的相对速度接近于零，但飞船以地球给它的29.8千米/秒的速度继续飞行。为了要飞到火星还需要增加3千米/秒的速度。最佳的飞行航线称为双切轨道航线，飞船脱离地球的引力后受太阳的引力控制，因此是沿着围绕太阳的椭圆轨道运行，双切轨道航线要求飞船脱离地球时是处在离太阳最近的近日点上，在到达远日点时与火星的轨道相切，而火星恰好在这时运行到这里。这样的航线对出发的时间有严格的限制，不是经常有这样的机会。计算表明，每隔26个月才能有一次这样的机会。除了在路途上要飞行7个多月，宇航员必须在火星上停留约500天。

3. 繁重的研究任务

宇航员登上火星后的研究任务非常繁重。以往的探测器着陆探测的区域很有限，所进行的实验也很有限，并不能由此断定火星上从来没有存在过任何形式的生命。要想得到正确的答案，必须要查明火星的多方面的情况，比如近火星空间的宇宙风、宇宙射线、太阳辐射的强度与变化；火星大气的组成与运动规律；火星土壤与岩石中的水含量与水的存在形式，极地水冰的分布与储量，火星内部水的分布；土壤与岩石的矿物与化学成分；有机成分的特征，沉积岩的分布与形成环境；火星表面撞击坑与火山口环形坑的分布、形态、形成年龄；火星的地质构造与地质演化历史等等。如果能将火星土壤与岩石样品采集回地面，再开展系统而精心的研究，寻找火星古老而原始的微体生物化石，等等。

这一宏伟的计划正在实施中，空间探测的道路是十分艰难的，载人

着陆火星比“阿波罗”登月要难得多。21世纪将是空间探测的时代，我国的空间技术的发展也将逐步参与到登月和探测火星的行列。

三、金星和水星的空间探测

九大行星当中，水星和金星绕太阳公转的轨道都在地球轨道之内，所以都叫内行星。

1. 水星的空间探测

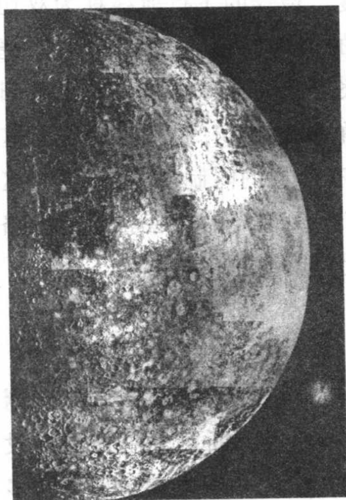


图 4-7 “水手”10号拍摄的水星照片（由多幅照片拼接而成）

水星离太阳太近了，从地球上看，它经常和太阳同升同落，经常会被强烈的太阳光辉所淹没。我们要见水星一面很不容易。1973年11月美国发射的“水手”10号探测器对金星探测之后又对水星进行了“顺访”，为我们送回了一大批高质量的水星照片和资料。人们发现，水星酷似月球，它的表面也布满了大大小小、密密麻麻的环形山(图4-7)。

目前人们对水星的了解还比较少。正因为如此，美国宇航局在2004年8月美国东部时间3日凌晨2时15分56秒发射了“信使”号探测器，准备对水星进行探测。水星离我们约9100万千米，“信使”号直接飞到水星只要3个月左右。但是，为了降低费用，“信使”号采取借助地球、金星和水星的引力降速，最终进入水星轨道的方法。因此，需要7年的时间才能到达水星。在经历绕太阳15周、飞近地球一次、金星两次、与水星擦肩而过3次的长达79亿千米的旅程之后，预计于2011年3月进入水星轨道。“信使”号进入水星轨道后将对水星展开为期至少1年的科学探测。

"信使"号携带了摄像机、远程化学分析分光仪、磁场强度计以及测量地貌的激光测高计。由于离太阳太近,"信使"号在水星轨道上面临高达370℃的高温,因此携有用陶瓷和纤维复合材料制成的矩形曲面屏,以保护探测仪器。

2. 金星的空间探测

金星是全天所有星星当中最明亮的一颗,最亮时可达-4.4等。自古以来人们就对金星十分感兴趣。我国古代称金星为"太白"。西方把金星叫做"维纳斯",维纳斯是希腊神话中掌管爱情与美丽的女神,因此人们把金星也看做是爱与美的象征。

金星与太阳的平均距离为1.08亿千米,是九大行星中距离地球最近的一个。金星的平均直径是12 104千米,九大行星中它的大小是与地球最接近的一个。金星被一层厚厚的大气包围着。曾有天文学家把金星和地球看做是非常相似的一对孪生姐妹,他们猜想金星大概具有和地球相似的环境,上面长满了茂盛的植物。地面上最大的望远镜的"视力"穿不透金星那层厚厚的大气,经过多次空间探测之后,人们对金星才有了比较全面的了解。原来,金星与地球的差别实在是太大了,它们真是徒有孪生姐妹的虚名。

从1961年2月12日起,苏联发射了"金星"号系列探测器,但前几个都没有成功。1970年8月发射的"金星"7号,同年12月首次在金星表面软着陆成功。从那时起一直到1983年,苏联又陆续发射了9个"金星"号探测器,多次到达金星表面,对金星进行了多方面的考察。1975年12月在金星表面软着陆成功的"金星"9号探测器拍下了第一张金星地貌照片。1983年10月到达金星表面的"金星"15号和"金星"16号两个探测器拍下了更精细的金星地貌照片,它的分辨率达到1～2千米。

美国从1962年到1973年发射了10个"水手"号系列探测器,其中有3个是去拜访金星的,2个成功。还有一个对金星和水星进行了双星观测。1962年12月14日发射的"水手"2号探测器飞掠金星上空时距金星34 000千米,拍下了金星的近距照片(图4-8),还测定了金星大气的

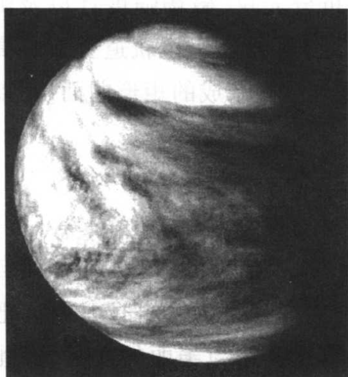


图 4-8 “水手”2 号拍摄的金星照片上可见金星被浓密的大气包裹着

化学组成以及温度、压力等情况。1978 年,美国又先后发射了两个“先锋金星”号探测器。这两个探测器中的第一个飞到了距离金星 150 千米的地方,第二个则在金星上着陆后又工作了 1 个多小时。1989 年 5 月由“亚特兰蒂斯”号航天飞机送“麦哲伦”号探测器去拜访金星。“麦哲伦”号携带了一套先进的电视摄像雷达系统,它能透过金星那厚厚的大气层对金星表面地貌进行探测,分辨率可达到 200 米(图 4-9)。

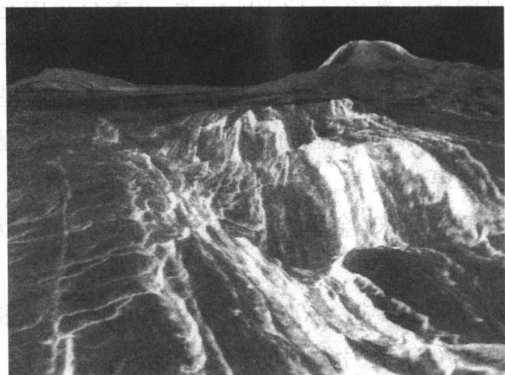


图 4-9 根据“麦哲伦”号探测器的探测资料,经计算机处理后得到的金星表面地貌照片

综合美、苏对金星的探测结果得知,金星上没有高山峻岭,也没有江河湖海,它的表面 70%以上的区域是平原,20%以上的区域是低洼地,另外 10%的区域是高原。在金星赤道偏北的地区,有两座很大的火山,比周围的平原大约高出 4000 米,其中一座火山的口径约有 700 千米,如此巨大的火山口,在太阳系其它天体上也是很少见的。根据探测,这两座火山还不完全是死火山。

探测器在金星表面还发现了一条很深的峡谷,自北至南穿过赤道,

绵延1000多千米。还发现了一些由撞击而形成的环形山，直径从20千米到50多千米，其中还有一些令科学家们十分感兴趣的环形山，这些环形山不是圆形的，而是扭曲的，像人的肾脏形的。没有发现金星上有像月球表面一样的直径很小的环形山，这是因为比较小的陨星体在到达金星表面之前早已在浓密的金星大气中燃烧殆尽了。

根据探测得知，金星大气的主要成分是二氧化碳，占大气总量的96%以上。假如站在金星表面上看天空，你绝对不会有在地球上看蔚蓝色的天空那种舒适的心情，因为金星的天空是令人望而生畏的橙黄乃至红褐的颜色。

浓密的大气层对金星表面的压力也是很强的，地球水准面的标准大气压是1个大气压，而金星表面是90个大气压，人在这么大的压力下早已命丧黄泉了。

金星表面温度高达480℃，而且不分白天黑夜，也不分赤道两极，到处都是地狱般的高温世界，任何生物都决不可能在那里生存。是什么原因造成金星的高温呢？原来这是金星大气层在作怪。以二氧化碳为主要成分的金星大气具有温室效应，它允许太阳光自由地穿过大气层到达金星表面，但是却不允许热量再散射出去。久而久之，金星表面的热量越积越多，就使金星成了太阳系中最热的行星。在“水手”2号之前，人类向金星发射的探测器屡屡遭挫，就与金星的高温有很大关系。

地球大气中的二氧化碳含量很小，只占大气总量的0.033%左右，它当然不会对地球有多大的威胁。然而，地球岩石和海洋中二氧化碳的含量并不比金星少，如果地球变得越来越热，这些二氧化碳就会从岩石和海洋中逐渐释放出来，长期如此，其后果就不堪设想了。因此，我们人类应从金星的温室效应中吸取教训，防止滥用各种燃料，注意保护地球上自然界的平衡，避免金星上的温室效应在地球上发生。

四、木星的空间探测

木星是太阳系九大行星中的佼佼者，它的体积最大，亮度仅次于金

星，而且几乎是长年可见。因此自古以来它就是人类关注的对象。20世纪70年代，有“先驱者”10号和11号，还有“旅行者”1号和2号共4个空间探测器拜访了木星。1995年12月，又有“伽利略”号抵达环绕木星的轨道，对木星及其卫星进行了长达7年的考察。通过它们的工作，我们得以发现木星的世界很精彩。

1. 类似“恒星”的木星

火星轨道之外的大行星是木星。木星是九大行星中个头最大的一个，而且它的形状有点特殊，呈扁圆形。它的平均直径约14.3万千米，是地球的11倍多，体积是地球的1316倍，其质量是地球的318倍，是余下八大行星质量总和的两倍半。木星距离太阳5.2天文单位。木星体积虽大，但自转很快，自转周期仅仅是9小时50分钟，大概它的扁圆形就是由于它的快速自转造成的。公转周期为11.86年。

1989年10月18日，美国的“伽利略”号探测器由“亚特兰蒂斯”号航天飞机载上太空，送入飞往木星的航程。“伽利略”号探测器的主要考察目标就是木星及其卫星。“伽利略”号经过6年的长途跋涉之后，于1995年12月抵达木星附近，对木星进行了全面的考察。在这之前，“先驱者”10号、11号已于1972年3月2日、1973年4月6日分别发射，它们又分别经过一年零八九个月的漫长路程，到达木星附近，对木星进行了各项科学考察。“旅行者”1号和2号分别于1977年9月5日和8月29日发射，沿着不同的路线飞往木星，分别于1979年3月和1979年7月与木星会合，拍到许许多多丰富多彩的木星及其卫星的照片，获得了大量未曾想到的探测成果。

像地球一样，木星也有大气层。通过大望远镜我们可以清楚地看到木星表面有许多平行于赤道的、明暗相间的条纹，这就是木星大气中存在着的条带状的浓云。木星的大气层厚约1400千米，成分与太阳差不多，其中氢占82%，氦占17%。

根据木星与太阳的距离来计算，木星大气的温度应该是-168℃，而目前实测的结果却是-140℃。体积庞大的木星，温度提高二三十度可

不是一件容易的事，这么多的能量来自何方呢？答案只有一个：来自它本身。科学实测也证实了这一点，探测器不仅接收到木星的红外辐射，而且还接收到很强的无线电波辐射。

恒星与行星的区别就在于它们是否会发光发热。木星能够发光发热，它究竟是恒星还是行星？在空间探测之前，科学家们已经猜想木星是颗“液体行星”，空间探测证实了这一点。它的表面是液态氢是肯定的，而其核心部分是液态还是固态的目前还是一个不解之谜。按照目前的状况，说木星是一颗恒星还不够资格。有的科学家认为，木星内部温度目前已高达28万度，那里正在进行着热核反应，只是释放能量的速度还不高，但它正在逐渐变亮，几十亿年之后，它就会演变成为一颗真正的恒星。

2. 木星大红斑和光环

木星的表面有一个非常显眼的特征，即在南半球上有一块红色的卵形圆斑，俗称大红斑(图4-10)。几百年来，虽然它的大小、形状、颜色和位置稍有改变，但是它像大气中的条纹一样，始终没有消失过。

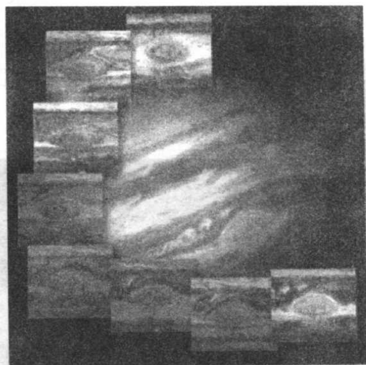


图4-10 “哈勃”跟踪拍摄的木星大红斑

大红斑到底是什么呢？这也是一个令人十分感兴趣的问题，几个飞向木星的探测器都对大红斑做了考察，原来大红斑是木星大气中特大的气流旋涡。整个气旋在不停地沿逆时针方向旋转。在木星大气 －140℃的低温条件下，分子运动应当是很缓慢的，何以能维持这样强大的气旋，并且经久不衰？这确实又是一个难解之谜。

17世纪初期望远镜发明之后不久人们便发现了土星的光环，300多年以来，土星一直被认为是惟一带环的行星。1977年人们发现天王星也

有光环。1979年“旅行者”1号又发现木星也拥有光环。木星环是由一些大大小小的黑色石块组成的，黑石块不反射太阳光，难怪人们用望远镜观察了木星几百年也不能发现光环的存在。木星环厚约20～30千米，宽数千千米，内边缘距离木星表面约5万千米，以每7小时一周的高速在围绕木星旋转。

3. 木星的卫星

迄今为止，共发现木星的60个卫星。木卫一、木卫二、木卫三和木卫四是伽利略发现的，故人们一直称它们为伽利略卫星，它们也是太阳系中除月球之外最早被发现的4个卫星(见彩图5)。木卫一和木卫二与我们的月亮大小差不多，而木卫三和木卫四都比月亮大很多(图4-11)。下面给出这5个卫星的半径值(千米)：

木卫一　1815，
木卫二　1569，
木卫三　2638，
木卫四　2400，
月　球　1738。

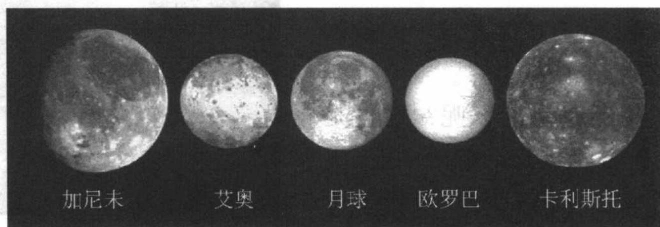


图4-11　“伽利略”号拍摄的木星卫星和月球的比较。
从左至右分别为：木卫三(加尼未)；木卫一(艾奥)；
月球；木卫二(欧罗巴)；木卫四(卡利斯托)

1996年到达木星附近的“伽利略”号探测器(图4-12)，发现木星的这4个卫星各具不同的特色，非常精彩。木卫一上至少有九个活火山正在猛烈地向外喷发，其中一个的喷发物高达四五百千米(见彩图10)。木卫

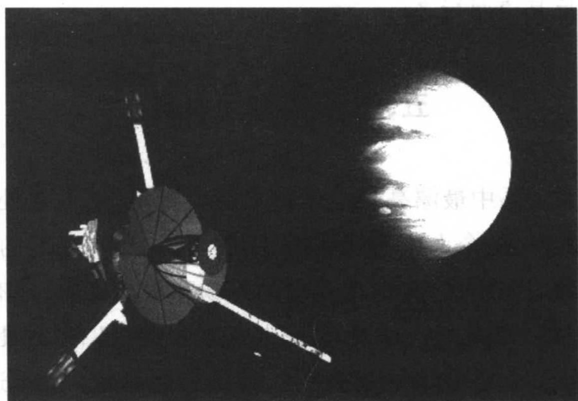


图 4-12　拜访木星的“伽利略”号探测器

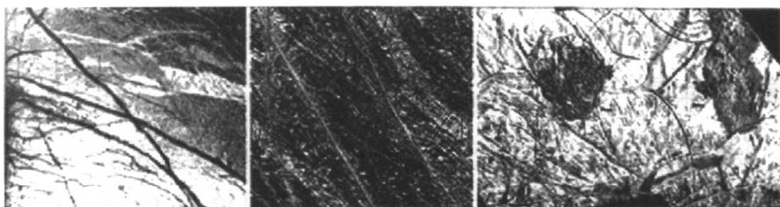


图 4-13　“伽利略”号拍摄的木卫二表面细节

二的表面被冰层覆盖,冰层之上沟壑纵横(图 4-13)。科学家们猜想冰层之下是液态的水,水里可能还有生命存在。木卫三的直径达 5276 千米,是目前已知的太阳系全部 100 多个卫星中最大的一个,甚至于还超过了水星和冥王星,木卫三的最大特点是它拥有自己的磁场。这说明虽然它的外部寒冷,但是它的内部却可能具有一个能够产生磁场的熔化的金属核,与地球的情况非常相似。身为卫星的木卫三却具有类似行星的特点,令人惊叹。木卫四又完全是另外一种世界,它的表面被一层厚厚的黑尘所包裹,上面还布满了密密麻麻的环形山,有一串环形山像锁链一样一个紧挨一个地连接在一起。

在木星上看木星的卫星当是一幅十分美妙的景象,众多的卫星不仅大小不一,尤为惹人注目的是一些卫星围绕木星自西向东旋转,另外一

些卫星却是反其道而行之。

五、土星的空间探测

土星是太阳系中最漂亮且最具魅力的大行星,动人之处很多,如它那光彩亮丽的光环、令人眼花缭乱的 31 颗卫星、比水还轻的密度,它那时有风暴出现的大气层、与地球相似的磁场和极光现象,还有可能会孕育生命的土卫六等等。早在 20 世纪七八十年代,已有“先驱者”11 号、“旅行者”1 号和 2 号先后拜访过土星,但是它们都是在土星近旁匆匆而过。而如今,2004 年 7 月 1 日进入预定轨道的“卡西尼”号将围绕土星运行 74 圈。我们期待着“卡西尼”能给我们带来有关土星家族的最新信息。

1. 美丽的土星

九大行星当中,土星是最美丽的一个。土星的轨道在木星之外,是人们肉眼所能看到的最远的一颗行星。土星的直径 12.07 万千米,是地球的 9.41 倍,比木星略小一点。土星距离太阳 14.4 亿千米,合 9.6 天文单位。土星的体积是地球的 745 倍,而质量却只有地球的 95 倍,它的平均密度为 0.7 克/厘米^3,是九大行星当中密度最小的一个,也是惟一一个密度比水还小的行星。像木星一样,土星自转也很快,周期为 10 小时 14 分钟,它比木星还扁,极半径比赤道半径短 5500 千米,是太阳系中最扁的一个大行星。它的公转周期是 29.46 年。

土星最大的特点就是它拥有一个十分宽大、明亮的光环。我们通过一个小型天文望远镜就能看见土星的光环,它就像给土星戴上了一顶漂亮的大草帽。

土星由于它那与众不同的特点引起天文学家对它的足够重视。70 年代之后,“先驱者”11 号,“旅行者”1 号和 2 号先后考察过土星,使人们对土星的认识也一下子大大地丰富起来了。

探测发现，土星大气的成分主要是氢和氦，还有少量的甲烷和氨等其它气体。土星的云层中也有黄色、桔黄色和桔红色的带状结构，但是远比不上木星的那样明显。空间探测证实，土星大气的实际温度比理论计算值高出大约30℃左右，说明土星也有自己的能源，也在发射红外辐射。土星也是一个液体行星，在它浓密的大气层下面，是由氢和氦组成的汪洋大海。但是土星的核心是否也是由氢和氦组成？是液态还是固态？目前还都是未解之谜。

专门为探测土星而设计的大型宇宙飞船“卡西尼”号于1997年10月15日发射升空，经过7年的长途跋涉，于2004年7月飞临土星，进入预定的环绕土星运转轨道，它将对土星及其卫星进行为期4年的探测研究。我们期待着“卡西尼”号能为我们解开更多的土星之谜。

2. 土星探测新发现

三个宇宙飞船对土星的探测，最精彩的部分当然是光环了。早在19世纪时，天文学家们已经知道土星的光环不是一个整体，而是由无数大大小小的冰块组成的，中间也夹杂着一些石块和铁块。通过雷达探测发现，组成光环的冰块直径大约为4～30厘米，它们的总质量约为2.5×10^{22}千克。后来又发现，土星光环可分为A、B、C三个环。A环和B环之间有宽5000千米的卡西尼环缝，B环和C环之间有宽3000千米的缝，叫法兰西环缝。三个环中C环距离土星表面最近，C环内边缘距离土星表面1.3万千米；A环距离土星表面最远，A环外边缘距土星表面约7.7万千米。1969年人们在C环以内又发现了D环，在A环以外又发现了E环。土星光环很宽，但很薄，它的厚度仅有20千米左右。

1979年，“先驱者”11号发现A环的外面还有另外2个环：F环和G环。1980年，“旅行者”1号在距离土星12万多千米的地方对土星光环进行了细致的考察，发现土星光环并非只有7条，而是密密麻麻的，多得几乎数不清，有人形象地比喻它就好像是一张巨大的密纹唱片，从土星云层上空一直排到距离土星32万千米的地方。“旅行者”1号还发现，土星光环的结构十分复杂，不仅大小宽窄各不相同，而且还不对称，就连最

宽最亮的B环也并不是完整的一圈。有的大环中套着小环,有的呈犬牙交错的锯齿状。F环更是特殊,它由三股细环扭结在一起,宛如女孩子头上梳起的一条长辫子。更令人惊异不已的是,土星光环还发出强大的无线电波。另外,光环本身似乎还有大气包裹着。

"旅行者"2号于1981年8月又来到土星附近,距土星最近时为10.1万千米,拍到了比前两次更精细、更清晰的光环照片。它再次证实土星光环决不仅仅是简单地分为几条,它那粗粗细细的条纹成千上万,的确像是一张硕大无比的密纹唱片(见彩图9)。"旅行者"2号看到的F环与9个月前"旅行者"1号所见已经大不一样,"扭结"已经解开,但在里面却又衍生出了14个独特的小环,环中还有一些光亮的团块,这充分说明随着时间的发展光环的变化是很快的。"旅行者"2号还测量了土星光环的温度,大约为-208℃~-198℃;它还发现在光环的环缝中也并不是空空的,在A环的环缝里有一条卷曲状的小光环在游动。

3. 土星的卫星

70年代之前人们一直认为木星的卫星最多,居太阳系九大行星之冠。空间探测发现了土星的十多颗卫星,使土星的卫星数曾经超过了木星,在九大行星中排行榜首了。目前,木星的卫星数又超过了土星,土星仍屈居第二。

现在已知土星拥有31颗卫星。土星众多的卫星中最引人注目的当属土卫六。"旅行者"号对它探测后确定出它的直径是5150千米,在太阳系100多颗卫星中,仅比木卫三小一点,名列第二。更令天文学家感兴趣的是它像木卫三一样也有厚厚的一层大气,大气中99%是氮气,另外1%是甲烷、乙烷和丙烷等碳氢化合物。土卫六高层大气的温度约为-100℃,低层大气的温度大约在-180℃左右。科学家们认为它的表面条件与45亿年之前的原始地球极其相似。那里可能会有与早期地球生命形成相似的过程发生。

土卫一、土卫四和土卫五,也很吸引人。这三颗卫星很多地方都很像我们的月球。首先,它们都和月球一样,自转周期和公转周期相同,所

以始终都以自己的同一半球对着土星。其次，它们的表面也像月球一样有许多大大小小的由陨星撞击而形成的环形山。在土卫四上甚至还可看到类似月球表面的辐射纹。

4. “卡西尼”再探土星

“卡西尼”号土星探测计划，是一项以美国宇航局和欧洲空间局为主、共有17个国家参加的大型国际合作项目。“卡西尼”号直径3米，高7米，重6.4吨，携带了各种功能的最先进的科学仪器设备(图4-14)。整个计划耗资34亿美元。“卡西尼”号是1997年10月15日在卡那维拉尔角肯尼迪航天中心由“大力神”号火箭送入太空的，已于2004年7月1日进入绕土星运转的轨道。法国天文学家G.D.卡西尼(1625—1712)对土星研究有突出贡献：发现土星的4颗卫星和土星光环中间的一条暗缝——卡西尼环缝。这次空间探测有3个亮点：

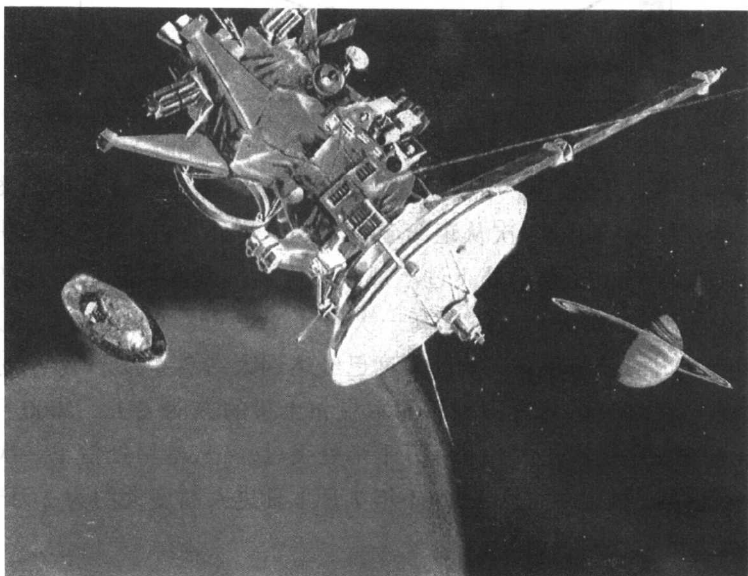


图4-14 “卡西尼”号探测器

(1) 神奇的"借力入轨"路线

"卡西尼"升空后,在太空中运行了将近 8 年时间,才飞到土星附近。为什么"卡西尼"的旅途如此漫长呢? 这是为了使它做到"低成本、高效率",走了一条"借力入轨"路线(图 4-15)。不仅可以节省大量的燃料,同时又可以大大地减小飞船自身的重量,从而能够让它携带更多的科学仪器和设备。

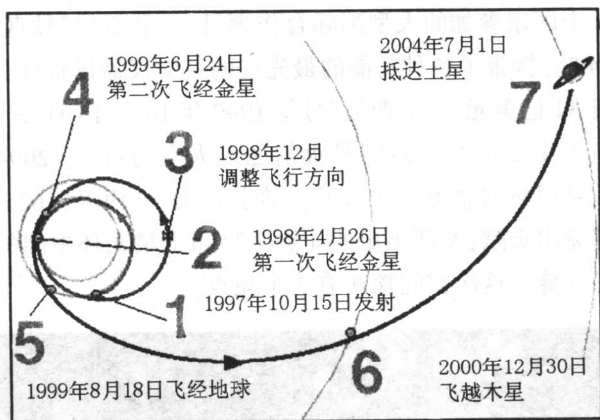


图 4-15 "卡西尼"号探测器的飞行路线示意图

1998 年 4 月 26 日,"卡西尼"第一次从距离金星 287.2 千米处飞过,1999 年 6 月 24 日,第二次从距离金星 617 千米处飞过;1999 年 8 月 18 日从距离地球 1173 千米处飞过。每一次从金星或地球附近飞过,它都在金星或地球的引力作用下提高一次速度。经过这 3 次从行星那儿借力以后,"卡西尼"号宇宙飞船的速度已经达到大约 7.4 万千米/小时,同时调整飞行方向,朝着外太阳系的木星和土星的方向飞去。2000 年 12 月 30 日它从距离木星大约 980 万千米处飞过,又从木星处借了一次力,然后径直朝土星飞去。已于 2004 年 7 月 1 日进入高度大约为 2 万千米的环绕土星运行的轨道。

(2) 用 4 年的时间全面考察土星及其光环

"卡西尼"于 2004 年 7 月 1 日达到土星以后,将环绕土星运行 74 圈,

共达 4 年之久。先是在土星赤道面上运行，有多次接近土星卫星的机会。以后，它将依靠自己的小型反作用力推进器，逐步改变运行轨道的角度，这样，它就能够纵览土星全貌，保证它用 4 年时间完成对土星、土星光环和土星卫星的多项考察任务。以往对土星的探测，如“先驱者”11号，“旅行者”1 号和“旅行者”2 号都是从土星近旁飞驰而过，而“卡西尼”却要在土星跟前逗留整整 4 年时间。将逐一检验目前人们对土星的认识是否正确，并对它进行更深一步的了解。“卡西尼”是否会让我们重新认识土星，我们拭目以待。

(3) “惠更斯”登陆泰坦表面

惠更斯(1629—1695)是荷兰著名的物理学家、天文学家和数学家。1655 年他用自己研制的望远镜发现了泰坦(土卫六)。这次土星探测中要把一个子探测器送到泰坦表面，就用其发现者的名字命名。

泰坦是太阳系中第二大的卫星，直径达 5150 千米，仅次于排行第一的木卫三。泰坦的表面被一层浓密的大气层包裹着。已有的探测表明，泰坦的大气密度甚至比地球大气的密度还要高，大气中 99% 都是氮气，其余 1% 是甲烷、乙烷、丙烷等碳氢化合物。高层大气的温度大约为 -100℃，低层大气的温度大约为 -180℃ 左右。泰坦表面浓密的大气层在高能粒子和紫外线的作用下，会发生一系列化学反应而生成其它复杂的有机分子。大气中的这些有机分子聚集多了以后会逐渐落到泰坦表面。这一过程与早期地球生命形成的情况非常相似。因此，科学家一直希望能在泰坦上面找到生物，主张对泰坦的大气层和表面进行深入的探测。

为了完成这一特殊任务，“卡西尼”携带了“惠更斯”号着陆器，准备释放到泰坦的表面上。2004 年 12 月 25 日，“惠更斯”号子探测器已经与环绕土星运行的“卡西尼”号成功分离。为了能够更有效地采集土卫六大气样品，“惠更斯”在向土卫六降落之前，要先在它的大气层中飘 22 天(图 4-16)。“惠更斯”上面配备了 6 种科学仪器，我们期待着它能不负众望，为我们带来土卫六的宝贵信息。

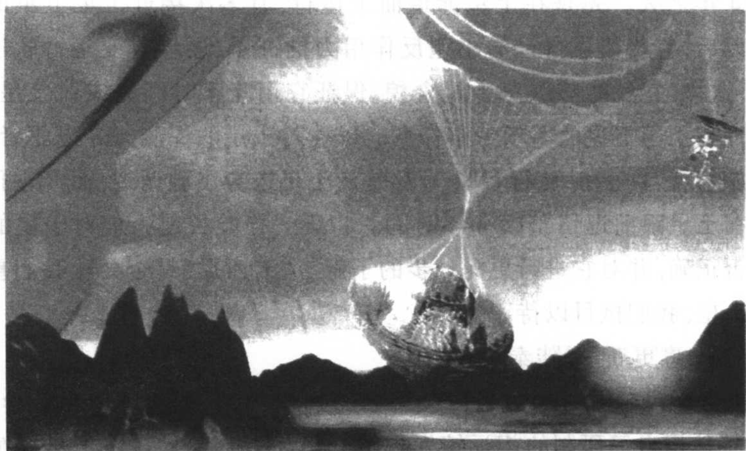


图 4-16 将在土卫六登陆的“惠更斯”号子探测器(太空美术作品)

六、天王星、海王星和冥王星的空间探测

天王星、海王星和冥王星是太阳系九大行星当中距离太阳最远的三个,它们一个比一个暗,仅凭肉眼都看不见,因此古人根本不知道它们的存在。这三个行星每一个的发现经过都在天文学历史上留下了光辉的一页。20 世纪 80 年代,“旅行者”2 号在飞离太阳系之前访问了天王星和海王星,而关于它们的信息并不多,至今还没有空间探测器去造访过冥王星。但是,探测这三颗遥远行星的计划正在酝酿之中。

1. 天王星

天王星是 1781 年由著名的英国天文学家威廉·赫歇尔发现的。天王星最亮时能达到 6 等星,眼力好的人勉强能见。它的直径 5.2 万千米,是地球的 4 倍多。它与太阳的平均距离是 19 个天文单位。

天王星最大的特点是它的自转轴几乎和公转轨道平面平行,好像是懒洋洋地躺在轨道平面上自转和公转的。而地球和其它行星则基本上

是站在轨道平面上自转和公转的。天王星公转一周需要 84 年，然而它自转一周的时间仅为 16.8 小时，比地球的自转还快。

天王星也有光环，但是它的环细而暗，地面上的大型望远镜也看不见它，1977 年，天文学家利用天王星掩食恒星的机会发现了天王星的环(图 4-17)。

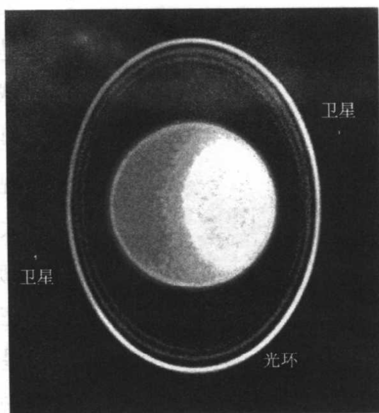


图 4-17　哈勃空间望远镜拍摄的天王星照片，不仅光环清晰，还可看见卫星

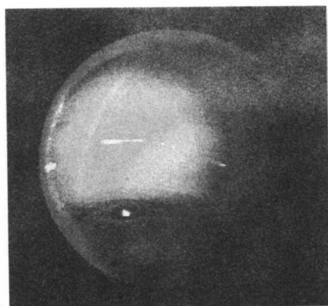
天王星的卫星也比较多，共有 15 个。较早发现的 5 颗卫星都比较大，有 4 颗卫星的直径都在 1000 千米以上。“旅行者”2 号飞近天王星的时候对 5 颗早已知道的卫星拍了许多照片，发现这些卫星的地貌很像地球，特别是天卫五的地貌非常丰富，既有悬崖峭壁，又有高山峡谷。

2. 海王星

海王星是著名的“笔尖上”发现的行星。面对天王星轨道的观测和理论计算总不相符的事实，人们猜想这是天王星轨道外面的一颗行星的影响所致。这颗行星在哪里呢？当时年仅 24 岁的英国大学生亚当斯(1819—1882)和 34 岁的法国天文台的勒威耶(1811—1877)分别通过理论计算给出了这颗行星的轨道、质量和大概的位置。后来，终于被观测发现。

海王星在天王星之外，距离太阳 30 个天文单位。直径比天王星略小一些，为 4.9 万千米，是地球的 3.9 倍。公转周期比天王星更长，要 164.8 年才能绕太阳一圈，自转周期是 17 小时左右。

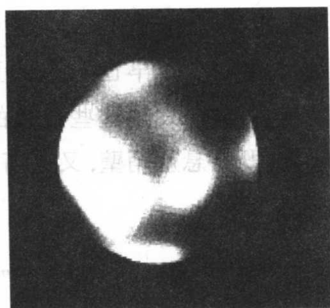
1989 年 8 月，“旅行者”2 号宇宙飞船飞近海王星进行了探测(图 4-18)。海王星的周围也有厚厚的云层，大气中氢和甲烷是主要成分。海王星的


图 4-18 “旅行者”号拍摄的海王星照片

表面被一层厚厚的冰所包围，核心可能是岩石。它所接收到的太阳能量只有地球的 1/900，表面温度为 -227℃。海王星如此之冷，但大气中却有非常活跃的现象，风速可达325 米/秒，比地球上的最大风速还要大得多。海王星也有环带。“旅行者”2 号观测到了海王星的环。现在我们已经知道九大行星中的木星、土星、天王星和海王星都有光环，这说明了它们的形成与演化有着共同的特点。

3. 冥王星

冥王星是目前已知太阳系中最边缘的一颗行星(图 4-19)。它也是太阳系九大行星中最暗、最冷、最小的行星了，它的直径为 2300 千米。冥王星的亮度只有 13 等，一般的小型天文望远镜根本看不见它。它的发现过程非常艰难，是经过两代天文学家，历经几十年坚持不懈的努力才得到的。它最后是在 1930 年由美国洛韦尔天文台年轻的天文学家汤博发现的。


图 4-19 根据“哈勃”观测资料经电脑处理得到的冥王星照片

冥王星只有一颗卫星，名字叫查龙，也叫冥卫一。它的自转周期与公转周期相同，都是 6.387 天，所以它像月球对地球一样，也是总以同一半球对着冥王星。更令人惊叹的是，冥王星的自转周期与冥卫一的自转周期也完全相同。这样，冥王星也总以同一半球对着冥卫一。这两个星球就像一对正在跳交谊舞的舞伴，始终面对面地转动不已。冥卫一的直径有 1160 千米，作为卫星来说，与冥王星的直径相差太小了，这是九大行星所有卫星中绝无仅有的。有人猜

想，它们可能不是行星与卫星的关系，而是一对“双行星”。

目前，人类对冥王星的了解还不算太多，至今也还没有宇宙飞船飞到冥王星附近去做过实地考察。

思考和复习题：

1. 简述太阳系九大行星的最重要特征。
2. 太阳系中有多少行星有卫星？最有特色的是哪几个？
3. 试评述空间探测对行星研究的重要性。
4. 为什么科学家特别重视火星的空间探测？

第五讲

太阳活动和太阳磁流体力学

宇宙中有数不清的恒星，太阳仅仅是其中的普通一员。但太阳是太阳系的主宰，是与我们息息相关的一颗恒星，也是惟一将它的面容展现给我们的恒星，被我们观察得非常仔细，成为揭示恒星世界奥秘的一个样板。太阳看上去很平静，但实际上太阳是处在不断骚乱的状态之中，时常发生诸如黑子、日珥、耀斑等活动现象。太阳的辐射、磁场的延伸和发射的粒子流不仅对地球有巨大的影响，也控制了行星际的空间环境。太阳上发生的一切对地球都可能产生影响。近百年来，原子物理学和量子力学促成了太阳和恒星的光谱学研究，核物理和粒子物理揭开了太阳能源的秘密并促成中微子天文学的诞生。而太阳上发生的大量活动现象都与太阳是一个具有普遍磁场和比较强的局部磁场的等离子体气体的物理过程有关。瑞典天文学家阿尔文最先指出宇宙中普遍存在磁场和等离子体，为研究太阳的活动现象而发展了太阳磁流体力学，进而发展为宇宙磁流体力学，成为天文学中的一个基础理论，阿尔文为此荣获了 1970 年的诺贝尔物理学奖。

一、太阳的基本情况

在恒星世界中,太阳的质量、大小和温度都居于中等地位。质量约为 1.99×10^{30}千克,是地球的 33 万倍,平均密度为 1.409 克/厘米^3,正处中年时期,年龄约 50 亿年。太阳是炽热的气体球,表面温度约 5800 K。太阳与地球的平均距离是 1.495 978 70 亿千米,近似地说是 1.5 亿千米,这个数值在天文学上就叫做 1 个天文单位。半径是地球的 109 倍,体积是地球的 130 万倍。

太阳含有 68 种元素,氢占 78.4%,氦占 19.8%。其它元素很少,氧为 0.8%,碳为 0.3%,氮、氖、镍各占 0.2%,其余元素均在 0.1% 以下。这些元素在地球上都有。其中氦元素是首先在太阳上找到的,因此氦获得了"太阳元素"的美称。

根据太阳大气不同深度的不同性质和特征,把它从里向外分为几个层次(见图 5-1)。太阳的中心部分称为日核,它的半径大约为0.25 个太阳半径。日核虽然不算大,但太阳的大部分质量都集中在这里,而且太阳的能量是在日核区的氢原子核聚变为氦的过程中释放出来的,因此,日核也叫做"核反应区"。

日核外面的一层称为辐射区,日核产生的能量通过这一区域,以辐射的形式向外传出。它的范围从 0.25 个太阳半径到 0.86 个太阳半径。这里的温度比太阳核心低得多,大约为 70 万 K。辐射区外的一层称为对流层,太阳大气在这一层中间呈现剧烈的上下对流状态,它的厚度大约 10 万千米左右。

对流层外是光球。光球就是我们平时所看见的明亮的太阳圆面,我们所说的太阳半径,就是从太阳中心到光球的距离。光球厚度约 500 千米。光球之外是红色的色球层。色球层的厚度大约 2000 千米,上面布满了大小不一、形态多变的头发状的结构,称为针状体。色球层的温度越往外面越高,最外层的温度高达几万摄氏度。色球层平时看不见,只有日全食时,当太阳光球被月亮完全遮住的那一瞬间,美丽的色球层才

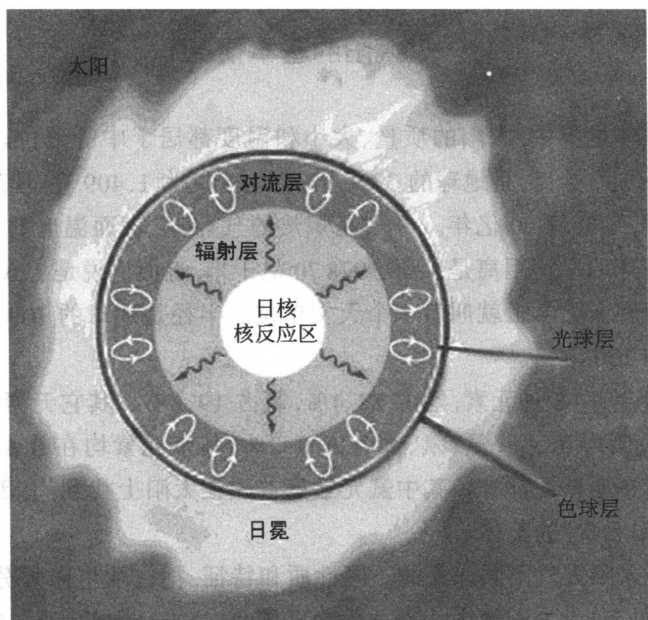


图 5-1　太阳的结构示意图

能显露出来。为了在平时也能对色球进行观测和研究，天文学家发明了色球望远镜，这种望远镜上附加了一种只允许红光通过的滤光器。

日冕是太阳大气的最外面一层，从色球层的边缘向外延伸出，分为内冕和外冕，内冕厚约 0.3 个太阳半径，外冕则达到几个太阳半径甚至更远。日冕的亮度只有光球的 1%，平时也看不见，只有在日全食的时候日冕才显露出它的“庐山真面目”。日全食的机会很少，天文学家又发明了日冕仪，平时就可以对日冕进行观测(见图 5-2)。

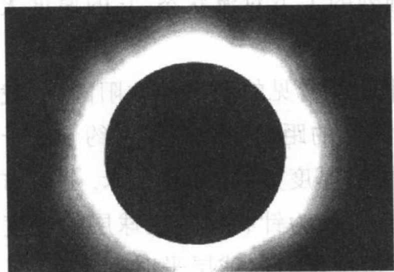


图 5-2　太阳的日冕

太阳光球的温度大约是 5800 K，越往外温度越高，到了色球和日冕交界的区域，温度可达几十万度，内冕的温度达几百万度。日冕的

形状不是固定不变的，它有时大致为圆形，有时呈扁圆形，有时又呈不规则的形状。

二、太阳的辐射机制

尽管太阳是距离我们最近的一颗恒星，由于太阳的高温状态，人类不可能像探测月球一样到太阳表面去进行实地考察。要想深入地了解太阳，则要尽可能多的接收和分析来自太阳大气的辐射、太阳核心部分出来的中微子，以及不时吹来的太阳风中所包含的电子、质子、中子和其它高能粒子，还有延伸到地球附近的太阳磁场。

太阳的光芒四射，这仅仅是它辐射的能量的可见光部分。从远古到第二次世界大战前后，观测和研究太阳都是用肉眼和光学望远镜，用照相技术和光谱仪观测来研究太阳。太阳是一个全波段天体，在射电、红外、紫外、X射线和 γ 射线都有很强的辐射。现在对太阳的研究已进入了空间和全波段研究的新时期。射电和X射线观测技术的发展很快，虽然起步比光学观测晚得多，但是已经揭示了许多有关太阳活动和活动区新的现象和规律。进入全波段研究以后，光学波段的重要性依然不减当年，也在迅速发展。光学观测的历史毕竟悠久，积累的观测资料极其丰富，有关太阳的基本知识主要是由光学观测获得的。

对于太阳基本状况的认识还是要从太阳光谱观测说起。最早要追溯到17世纪的伟大物理学家牛顿的一次实验。1672年，正在英国剑桥大学求学的牛顿做了一次太阳光谱实验，他让一束太阳光从窗上的一个小洞射进暗室，穿过一块三棱镜后投射到一块白色的屏幕上。一束白光扩展成一条美丽的彩色光带，就像雨后彩虹一样，呈现出红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等各种颜色（见图5-3）。这说明白色的太阳光实际上是由上述几种不同颜色的光混合而成的。这条美丽的彩色光带就叫做太阳的连续光谱。各种电磁波的传播速度是一样的，都等于光速 c，在真空或空气中约为每秒30万千米。在速度 c、波长 λ 和频率 ν 这三个物理量之间存在一个简单的关系式：$c=\nu\cdot\lambda$。太阳可见光通过三棱镜之后能够分解成

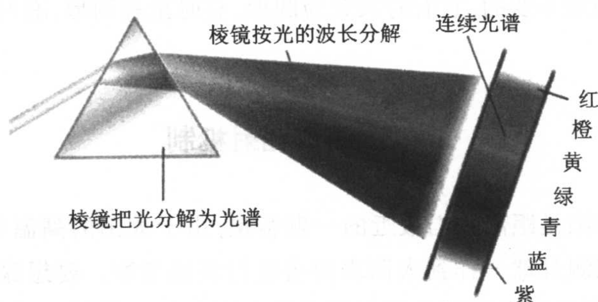


图 5-3　太阳光经棱镜后分为七色光

多种颜色的光是因为不同颜色的光在三棱镜里的折射情况不同，因此它们在穿过棱镜之后就分道扬镳，各走各的路了。太阳光经过棱镜后被分解为七色光，波长从 400 纳米至 700 纳米（1 纳米等于 10^{-9}米），覆盖了整个可见光波段，它们合在一起便呈略显黄色的白光。

在连续光谱的上面还有许许多多的粗细不等、分布不均的暗黑线，共有 2 万多条。这些暗黑线叫做吸收谱线，它是在 1814 年由德国化学家夫琅禾费首先发现的，因此也叫夫琅禾费线。另外在连续光谱上还有成千上万条明亮的谱线，叫做发射谱线（见图 5-4）。

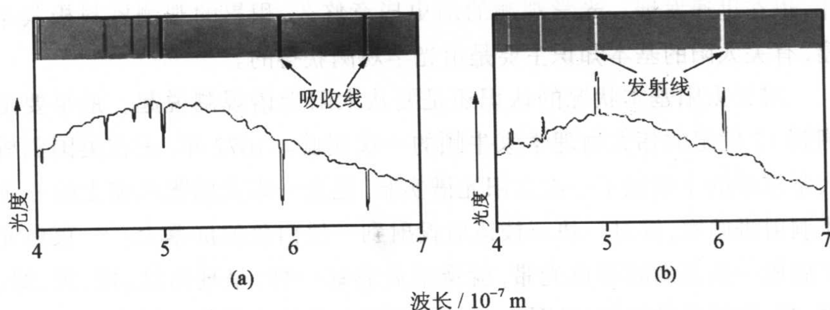


图 5-4　太阳光谱的吸收线(a)和发射线(b)

天文学家刚刚看到如此错综复杂的太阳光谱时，就好像是面对一部神秘难解的天书，暗的吸收谱线和亮的发射谱线各说明了什么问题呢？1870 年，德国物理学家基尔霍夫经过反复的试验和研究后发现了关于光谱的三

条定律。第一条是:凡是炽热的物体都会发出连续光谱。所谓连续谱就是所有波长上都有辐射,但不同波长上的强度不一样,有一个明显的峰值。峰值处的波长由温度决定,温度越高,峰值波长越短,温度越低,峰值波长越长。太阳的辐射特性与黑体辐射的特性很相近,由图 5-5 可以看出,太阳连续谱观测曲线和 5800 K 的黑体辐射谱相当。根据这一比对可以得出太阳光球的温度。第二条定律是:稀薄而且气压比较低的炽热气体会发出某些单独的明亮谱线。第三条定律是:连续谱光源的光经过比较冷的气体后会产生吸收谱线。也就是比较冷的气体将连续光谱中某一波长的能量吸收了。

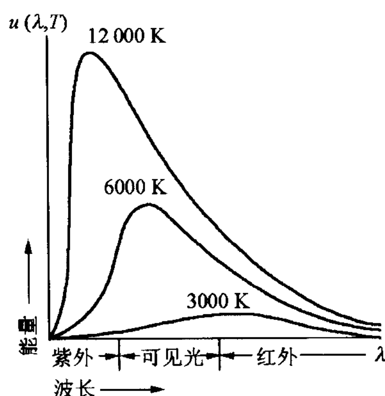


图 5-5　不同温度情况下的连续光谱

发射线和吸收线的产生是由于原子核外的电子在不同的能级间跃迁而发出或吸收的辐射。以最简单的氢原子为例,其原子核外只有一个电子,这个电子只能处于一些分离的能级上 E_n,通常处在最低能级上。当处在低能级的电子吸收能量($E_n - E_{n-1}$)后就会向高能级跃迁,连续谱在这个波长上的能量被吸收,就变成暗黑的吸收线。当处在高能级的电子向低能级跃迁后,将发出能量($E_n - E_{n-1}$),这就是发射线。如果原子核外电子吸收能量非常多,有可能使这个电子脱离原子核的影响而成为自由电子,这个原子就被电离了。

有了基尔霍夫的三条定律,天文学家通过对太阳光谱的分析和研究,对太阳大气的结构、物理状态、化学成分以及太阳活动的性质等等,有了越来越深入的了解。

三、太阳黑子和太阳活动周

缓变性太阳活动现象很多,如光球上的黑子和光斑,色球层上的谱

斑,日冕的冕洞等。其中,太阳黑子是人们最早发现也是最熟悉的一种。明亮的太阳光球表面,经常出现一些小黑点,这就是太阳黑子(图5-6)。我国古书中有很多关于太阳黑子的记载。《汉书·五行志》中对黑子的记载:“日出黄,有黑气,大如钱,居日中”,被公认为世界上最早的黑子记录。

发展充分的黑子通常由本影和半影组成(图5-7)。黑子中央部分的暗核称为本影,看上去是黑的,实际上并不真是黑的,它们也是炽热明亮的气体,只是温度比光球温度5800 K低多了,黑子本影温度大约是4300 K左右,相形见绌,显得暗黑了。包围着本影的颜色稍浅部分称为半影,是本影到光球之间的过渡区,其温度比光球温度略低。黑子的大小相差很悬殊,大的直径可达20万千米,比地球的直径还要大得多,小的直径只有1000千米。较大的黑子经常成对出现,并且周围还常常伴有一群小黑子。黑子的寿命也很不相同,最短的小黑子寿命只有两三个小时,最长的大黑子寿命大约有几十天。

1849年瑞士苏黎士天文台的沃尔夫提出用黑子相对数来代表太阳黑子活动的情况,被采用至今。黑子相对数 $R=k(10g+f)$,其中 g 是黑子群数,f 是单个黑子数,k 是各个台站的观测值之间的转换因子。由于望远镜、观测技术、观测方法和天气条件等的不同导致各个观测站所得黑子相对数不一样。比较各个台站的观测结果获得 k 因子的数值,沃尔夫的台站取为1。

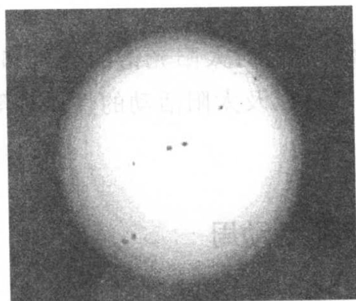


图5-6 太阳的光球和它上面的黑子

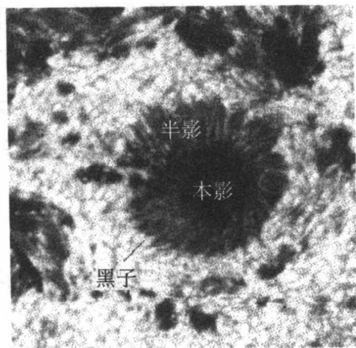


图5-7 黑子的本影和半影

黑子的数目有时多，有时少，具有平均为 11 年的变化周期(图 5-8)。这个周期并不是天文学家发现的，而是在 100 多年以前由德国的药剂师、天文爱好者亨利·施瓦布发现的。19 世纪初期，许多天文学家认为水星运动的异常是因为在水星的轨道以内有一颗“火神星”在作怪。施瓦布从 1826 年开始对太阳进行观测，想利用“火神星”凌日的机会来发现它。为了把太阳黑子与“火神星”区别开，他每天都要把日面上的黑子画下来。他坚持画了 17 年，到了 1843 年始终没有找到并不存在的“火神星”，但他却从几柜子的黑子图中意外地发现了太阳黑子 11 年的变化周期。他的论文因是“药剂师”的作品而被拒绝发表。施瓦布没有气馁，仍然坚持每天观测。又过了 16 年，到了 1859 年，施瓦布已经是一个双鬓斑白的老人。这时，当他把自己的成果告诉了一位天文学家之后，他的这一重大发现才得以公诸于世。

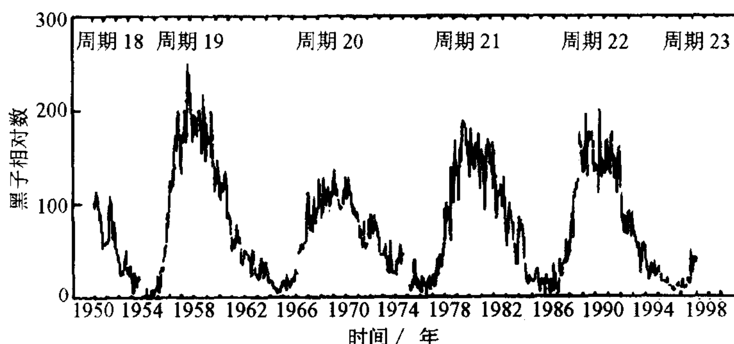


图 5-8　黑子活动的 11 年周期

1904 年，英国的天文学家蒙德尔把多个太阳活动周期里出现的太阳黑子，按时间序列和在日面的纬度分布，画在坐标纸上，结果得到了一系列蝴蝶状的图形。图 5-9 是应用 1940—1996 年的资料获得的黑子蝴蝶图。几乎所有黑子都分布在日面南、北纬 45°以内，而且在赤道两边 8°以内很少。在每个 11 年的周期中，黑子先在日面高纬地区出现，然后逐渐向低纬方向移动。

后来又发现黑子磁极性变化有 22 年周期。太阳黑子具有比较强的

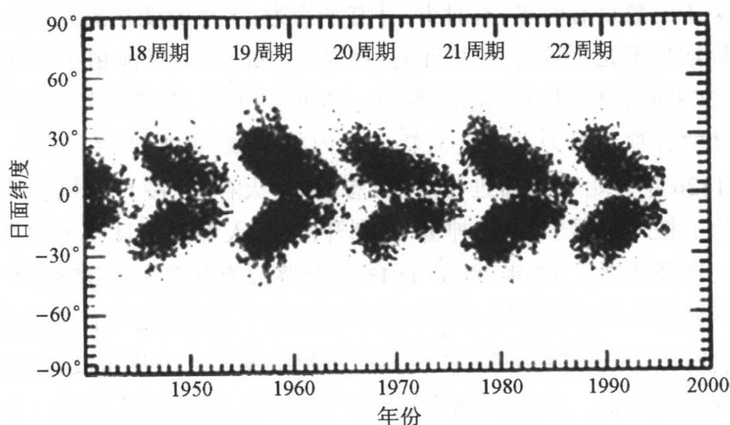


图 5-9 黑子蝴蝶图(日面上黑子群出现的纬度变化,每一只"蝴蝶"对应于一个黑子周)

磁场,偶极黑子群最为常见,前导黑子总是与后随黑子的极性相反。若前导黑子是南极(S),后随黑子则是北极(N),如图 5-10 所示。南半球上的黑子群的极性都是一样,而北半球的情况则反过来。每一个太阳活动周期中,这种磁极性分布保持不变,但下一个周期的情况则截然相反,呈现出 22 年的变化周期,称为磁活动周。

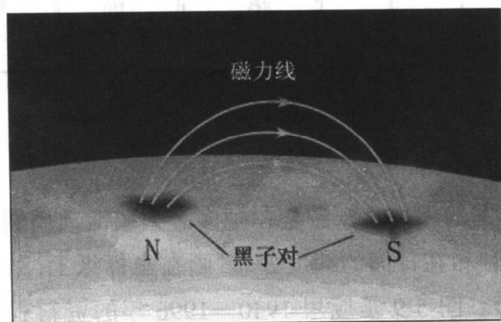


图 5-10 黑子对的磁场

其它太阳活动现象,如光斑、谱斑以及耀斑爆发等也具有 11 年的周期。太阳的 X 射线辐射也具有明显的 11 年变化周期(图 5-11)。国际天

文学会规定,每一个太阳活动周期是从太阳活动极小年开始到下一个极小年结束,并且规定从 1755 年开始的那个太阳活动周为第 1 个太阳活动周。长期资料的分析表明,太阳活动周期有时长些有时短些,最长达 14 年,最短还不到 9 年,平均为 11 年。在 1645～1710 年期间,太阳黑子非常少,活动非常弱,称为“蒙德极小期”。后来又发现太阳活动还有一个 80 年的周期。



图 5-11　太阳 X 射线辐射 11 年周期

缓变型太阳活动对地球的影响已引起人们的广泛注意。20 世纪 80 年代,地球上出现全球天气异常,自然灾害频繁,促使人们研究太阳活动对地球上各种现象的影响。发现太阳活动与地球自转周期的变化,我国夏季的温度变化,渤海的冰情,天津夏季的降水量,地震活动等均有比较密切的相关关系。缓变型太阳活动对地球影响的途径和机理并没有很清楚,是目前正在研究的课题。

四、激烈的太阳耀斑爆发和美丽的极光

太阳耀斑是太阳局部区域最剧烈的爆发现象,也是对地球影响最大的活动现象。其最大特点是来势猛,能量大,发生得很突然,消失得又很

快,一般只存在几分钟、十几分钟,极个别的能持续几个小时。在短短一二十分钟内耀斑释放出的能量相当于地球上十万至百万次强火山爆发的能量总和,真可谓惊天动地。实际上,耀斑爆发释放的能量主要不在可见光波段,而是相对集中在波长更短的波段和高能粒子发射。近 20 多年来,对耀斑的观测已经扩展到射电、紫外、X 射线、γ 射线波段,以及高能粒子的探测。空间观测提供了前所未知的信息,使我们对耀斑的认识产生了飞跃。在耀斑爆发之前的几分钟到十几分钟就有预兆出现,即在光学波段有亮点、暗条活动,射电波段有小的爆发出现,软 X 射线有缓慢的增强。在耀斑爆发期间,除了 γ 射线波段有推迟外,其它波段的爆发几乎同时产生。还观测到耀斑的中子发射。

耀斑首先在太阳色球中发现,但它们却是发生在太阳大气中从光球到色球直到日冕的一个立体区域中的爆发过程。耀斑和黑子有着密切的关系,在大的黑子群上面,很容易出现耀斑。中等强度的耀斑由于太阳光球的光太强而被淹没了,只有极个别的特大耀斑,在白光中也能看见,称为"白光耀斑"(图 5-12)。人类观测到的第一个耀斑就是这样的"白光耀斑",是在 1859 年 9 月 1 日,两位英国天文学家观测发现的。天文学家发明了一种特殊的太阳单色光照相仪,这种仪器只让某一种波长的光通过。这样便能很容易地观测到耀斑。彩图 14 是卫星拍摄到的红外波段的耀斑。

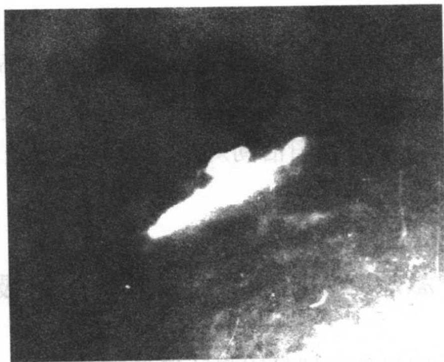


图 5-12 白光耀斑

耀斑对地球有巨大影响，因此在日地关系的研究中占有特殊的地位。太阳耀斑爆发对地球的大气压力、大气电状态、大气臭氧含量都有明显的作用。太阳高能粒子流到达地球附近时，会与地球大气分子发生剧烈碰撞，产生美丽的极光，也会将地球大气层中的电离层扰乱，使之失去反射无线电波的功能。地球上的无线电通讯，电视台和广播电台的信号传播，都会受到干扰甚至中断。太阳高能粒子流也会对宇宙飞行器以及宇航员的人身安全造成严重的威胁，更使耀斑的研究受到了天文学家特殊的重视。进入 20 世纪 90 年代中以后，一组空间太阳观测卫星上天，与地面上的太阳望远镜配合，进行更有效的观测，使空间灾害天气的预报和监测成为可能。所谓空间灾害天气，就是指那些日地物理效应明显的太阳活动事件。

2000 年 7 月 14 日，日面上爆发了第 23 个太阳活动周中最大的一次对地球空间环境产生巨大影响的事件。恰好，这天曾是法国大革命攻占巴士底狱的日子，国际上把这一太阳活动事件及其相关的效应通称为“巴士底事件”。全世界的太阳物理学家，对这一事件进行了全面的研究。我国国家天文台怀柔的太阳磁场望远镜取得国际上唯一完整的矢量磁场资料，为了解这一事件的本质提供了重要依据。

美丽的极光是耀斑对地球高层大气影响的产物，是惟一能用肉眼看到的高层大气中发生的物理现象(见彩图 15，16)。来自太阳的带电粒子闯入地球高层大气，和大气中的分子或原子碰撞而产生放电过程，形成了形态变化万千，颜色绚丽多彩的极光。极光的每一次出现，都好似大自然恩赐给人类的一幅美丽画卷。凡是有幸亲眼目睹过极光的人都会在他们的脑海里留下终身难忘的印象。

由于地球磁场的作用，太阳高能粒子到达地球时就向地球两个磁极靠拢，因此，只有高磁纬地区才能看到极光。磁纬较低的地区，只是偶尔能见到极光。在磁纬 60°～70°的区域内，围绕地球南北磁极的两个圆环状地带是观看极光最好的地区。地球的北磁极在加拿大境内。地球的磁南北极与地理南北极之间大约相距 11°。为什么在磁极区不是最好的观测极光的地区呢？这是因为来自太阳的高能粒子和地球磁场相互作

用，围绕地球磁极形成了一个近似椭圆形的环状区域，放电过程就在这个环状区域的边界上进行的。人们称之为极光椭圆（见彩图 17）。极光椭圆随太阳耀斑爆发的强度而变化。极光椭圆出现在地球高层大气中，相应的地面上能够看见美丽的极光现象。

五、活动日珥和爆发日珥

有幸看见过日全食的人，一定还记得那短暂而又壮丽的景色。太阳完全被月球遮住了，“黑夜”突然来临。在那个“黑太阳”的周围，镶着一个红色的光环，美丽极了，这就是太阳的色球层。天文学家形容太阳色球层像是“燃烧着的草原”，或说它是“火的海洋”，那上面许许多多细小的火舌在不停地跳动着，不时地还有一束束火柱窜起来，这些窜得很高的火柱就叫做“日珥”。

日珥绰约多姿，变化万千，有的像浮云，有的像喷泉，有的像篱笆，还有的似圆环、彩虹、拱桥，等等。日珥是太阳色球层上一种经常性的而且十分美丽壮观的活动现象。遗憾的是，日珥比光球暗得多，也只有在日全食时或者使用专门的太阳分光仪、单色光观测镜才能看到。从 20 世纪初起，天文学家用分光仪等对日珥进行详尽的观测和研究，包括它的光谱、结构、运动、形成和演变。1973 年后美国大型载人轨道空间站“天空实验室”上天，携带了多种观测太阳色球层的仪器，工作在紫外波段和 H_α 谱线。地面上的光学望远镜都采用 H_α 谱线。图 5-13 是“天空实验室”在紫外波段所拍摄到的大日珥。

日珥的大小不一样，一般高约几万千米，大大超过了色球层的厚度，延伸到日冕层当中。日珥的温度接近 1 万度。日珥分为宁静的、活动的以及爆发的三大类。顾名思义，宁静日珥比起另外两种日珥来，显然不够活跃，变化比较缓慢，一般能够在日面存在几天时间，因此能够经常看到宁静日珥。有时宁静日珥可以在日冕中存在数月之久，其形状丝毫不变。

在太阳活动区中时常会发生活动日珥和爆发日珥。活动日珥的速

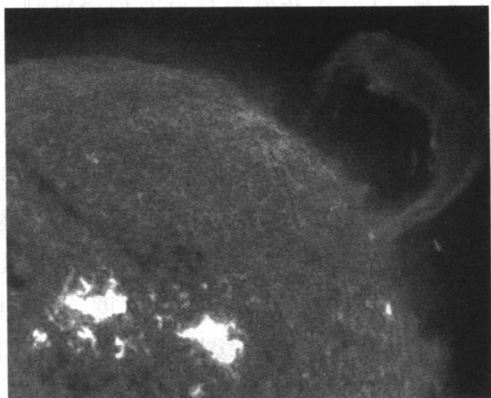


图 5-13 “天空实验室”载人轨道空间站在紫外波段拍摄到的大日珥

度比较低，它们的速度不足以逃逸太阳。它们像喷泉一样，从太阳表面喷出很高，又沿着弧形轨迹慢慢地落回到太阳表面。爆发日珥则是相对激烈的过程，速度很大，以每秒 1000 多千米以上的高速将等离子体物质喷发到日冕中，高度达几十万甚至上百万千米，蔚为壮观。它的物质将克服太阳引力的束缚而抛入行星际空间。天文学家曾观测到的一次最大的爆发日珥，上升高度竟然高达 157 万千米，超过太阳的直径。爆发日珥如此大规模地以非常高的速度抛射等离子体物质，动力从哪儿来的呢？一般认为只能从活动区的磁场能量转换而来。但是什么原因促使日珥形成爆发仍是天文学家们在探索中的课题。

六、冕洞和日冕瞬变

在通常情况下，太阳光球的光辉掩盖了日冕的辐射。在日全食时，当月球全部遮住光球时日冕才露出尊容。天文学家专门研制了日冕仪，放置在海拔 3 千米以上的高山上或放在太空中运行的人造卫星上观测日冕。

日冕非常稀薄但温度非常高，达到 400 万度，在光学波段很弱，但在 X 射线波段却很强。直到 1995 年“太阳及日球观测平台”卫星（SOHO）

观测到日冕中的“磁毯”以后才弄清楚日冕的加热机制。所谓“磁毯”就是在日冕中有许许多多零星的磁场，磁回路之间的相互作用释放能量，加热日冕。

早在1950年，天文学家就发现日冕中有些暗黑的区域。后来在远紫外线、X射线波段上也观测到这个现象，确认它们是日冕中的低温和低等离子体密度的区域。天文学家把这种区域称之为“冕洞”(图5-14)。冕洞的平均密度仅为日冕密度的1/3，冕洞中心的密度更低。日冕的温度为150～200万度，而冕洞的温度只有100万度。冕洞的形态多样，并不是一个圆圆的洞，形状和大小都会缓慢地变化，但它们的位置却基本不变。冕洞非常稳定，但是它们却与太阳风中速度高于600千米/秒的物质抛射事件密切相关。这也是冕洞的密度较低的原因。早在19世纪就发现地球的磁场常常发生很大的变化，也就是磁暴。磁暴不仅具有与太阳黑子相同的11年周期，还有每27天重复出现的周期，正好与太阳自转一周的时间相符。因此，人们推论地球上的磁暴必然与太阳上某个神秘的区域相联系。现在知道，这个区域就是太阳赤道附近的冕洞。

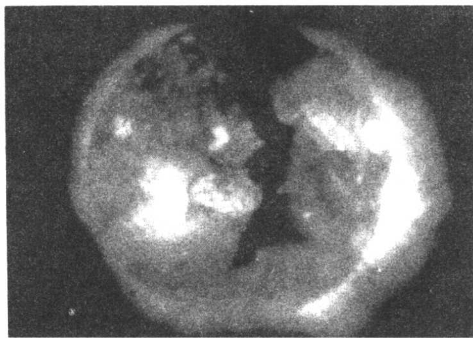


图5-14　太阳X射线照片上显示出的冕洞

日冕瞬变是发生在太阳日冕大气中的一种持续时间比较短的事件。它在一两个小时内从太阳表面喷射出几十亿吨等离子体物质。按形态分类有环状、泡状和云状瞬变。环状瞬变出现最频繁，它从最初在低日冕处形成一个明亮的环状物，然后向外传播，在传播过程中不断膨胀。

这是一个向外喷射物质的过程，每次瞬变事件要喷射约 5×10^{15}克的物质，传播速度达到 400 千米/秒，甚至更高。在传播到日冕外层时，它们的速度足以克服太阳的引力，继续向行星际空间运动。每次瞬变事件所携带的动能十分可观，有 10^{23}焦耳，最强的可达 10^{24}焦耳，这与一个中小型耀斑爆发的能量相当，所以日冕瞬变也是一种激烈的活动现象。

日冕瞬变事件伴随的现象常常有耀斑、光学暗条、射电爆发和 X 射线爆发。日冕瞬变事件约有 40%与耀斑爆发有关，50%的事件与爆发日珥有关，也有部分事件与耀斑和爆发日珥都无关。说明日冕瞬变事件既可以与耀斑和爆发日珥关联，也可以独立地发生。日冕瞬变事件机制成为当今太阳物理研究的一个备受关注的课题。而每一事件中抛射出的大量高速等离子体物质对行星际空间、地球环境产生什么样的影响也成为天文学家和地球物理学家迫切想解决的问题。

七、太阳振荡

太阳大气中丰富多彩的活动现象已经令我们目不暇接，然而 20 世纪 60 年代初太阳观测的一项重大发现更令天文学家惊讶不已。1960 年，美国天文学家莱顿将最新研制成的强力分光仪对准太阳表面上一个个小区域，准备测定它沸腾表面运动的情况。结果他却意外地发现，太阳就像一颗巨大的跳动着的心脏，一张一缩地在脉动，大约每隔 5 分钟起伏振荡一次。这次莱顿发现的太阳振荡，和以前发现的太阳黑子、日珥等各种太阳活动现象都不同，它不仅具有周期性，而且整个日面无处不在振荡。

莱顿发现太阳表面的这种振荡现象归功于著名的“多普勒效应”。当一个声源接近我们时，我们接收到的频率升高了，当它远离我们时，接收到的频率降低了。与声波一样，光也是一种波，自然也有多普勒效应。当光源朝向或远离观测者时，光的频率也要发生变化。在观察太阳光谱的时候，如果我们一直紧紧盯住连续光谱上的一条吸收线，那么当太阳表面的气体向上运动时，也就是朝我们奔驰而来的时候，吸收线就会往

光谱的高端即紫端移动，简称紫移。反之，当气体远离我们而去时，吸收线就会往光谱的低端即红端移动，简称红移。如果吸收线一会儿紫移，一会儿红移，不断交替变换，那么就表明，太阳表面的气体在上下振荡。

由于振荡的幅度和速度都不大，所以光谱线的位移量也很小，大约只有波长的百万分之几。这样微乎其微的变化，发现它是很困难的。莱顿使用非常精密的强力分光仪拍下一张张太阳光谱照片，测出谱线的波长和它们随时间的变化，终于发现谱线波长来回地红移和紫移，最后才确认发现太阳表面周期振荡的重要现象。

太阳5分钟振荡增加了我们对太阳运动状态的认识，天文学家对这个问题都十分重视，纷纷采用各种不同方法对太阳进行观测。主要有两类方法，一类是通过测量谱线的“多普勒效应”获得速度，另一类为连续谱的强度观测。“多普勒效应”测速方法虽然比较灵敏，但一些非“多普勒效应”因素也会引起谱线的视位移，因此可能带来不确定的误差。强度观测可避免这一缺点，但是太阳振荡信号十分微弱，从强烈的太阳辐射中提取出来困难很大，为此专门设计了放置在人造卫星上的太阳振荡观测仪器进行强度观测。太阳极大期观测卫星上的太阳总辐射计就成功地进行了太阳振荡的观测。世界上有许多研究单位都在从事太阳振荡的观测研究，因此在不长的时间里获得了非常丰富的资料。不仅证实了太阳表面5分钟的振荡，而且接二连三地又发现了其它好几种周期的振荡。有人得到周期为52分钟的太阳振荡，有人得到周期为7～8分钟的太阳振荡。最引人注意的是苏联天文学家谢维内尔和法国天文学家布鲁克斯等得到的周期为160分钟的长周期振荡。

太阳振荡虽然发生在太阳表面，但其根源却在太阳内部。因此，研究太阳振荡成为获得太阳内部信息的又一个途径。在这以前，太阳中微子是太阳内部惟一信息来源。使太阳内部产生振荡的因素可能有三种，即气体压力、重力和磁力。由它们造成的波动分别称为“声波”、“重力波”和“磁流体力学波”，这三种波动还可以两两结合，甚至还可以三者合并在一起。就是这些错综复杂的波动，导致了太阳表面气势恢宏的振荡现象。人们认为，太阳5分钟振荡可能是太阳对流层产生的一种声波，

而160分钟的振荡则可能是由日心引起的重力波。但是,这些解释究竟正确与否,目前还不能肯定。

声波是一种比较简单的压力波,它可以通过任何介质传播。太阳的声波是与地球内部的地震波有些相似的连续波,它们传播的速度和方向依赖于太阳内部的温度、化学成分、密度和运动。与地球物理学家通过研究地震波去查明地球内部的构造模式类似,天文学家正利用他们所观测到的太阳的振荡现象,去窥探太阳内部的奥秘。目前,太阳振荡的研究已经发展成一门新兴的日震学分支学科。

八、太阳磁流体力学

磁流体力学是太阳物理最重要的理论基础。因为太阳是一个典型的具有磁场的等离子体实体球。瑞典科学家阿尔文是磁流体力学的奠基人,他首先应用这个理论研究太阳,因此也称是太阳磁流体力学。由于这一理论也适用于宇宙中其它天体和星际介质,也就成为宇宙磁流体力学。

阿尔文1908年5月30日生于瑞典。在乌普沙拉(Uppsala)大学毕业,1934年获得博士学位。他是一个善于提出新概念、新思想,从天文现象中发现新的物理规律、用理论解释复杂的天文现象的学者。当他还是博士研究生的时候,他就创立了一个关于宇宙辐射起源的理论。



图5-15 瑞典天文学家阿尔文

1. 宇宙到处有磁场

1937年在阿尔文29岁的时候,首先提出:"银河系的星际空间到处都存在磁场。"在那时,银河系的磁场并未观测到,也没有人承认银河系到处都有磁场。这一假设一直受到冷落,到40年代才发现

银河系存在磁场的迹象。直到60年代测出银河系磁场的分布之后才最后证实阿尔文的假设。事实上,宇宙中到处都存在着磁场。地球、太阳、恒星、星系都有磁场,就连物质特别稀少的星际空间、星系际空间也有磁场。地球的磁场强度很弱,只有 0.5×10^{-4}特。太阳的平均磁场约为 2×10^{-4}特,太阳黑子区域的磁场比平均却高几百至几千倍。有些恒星磁场很强,可达几特,白矮星的磁场达到 $10\sim10^{3}$ 特。宇宙中磁场最强的要算中子星,达到了 $10^{4}\sim10^{10}$特。银河系星际空间的磁场仅仅有 10^{-10} 特。太阳是惟一的一颗能给出表面磁场分布的恒星。黑子是太阳磁场最强的区域,一个大黑子的磁场强度可超过0.4特。磁场起源于太阳光球之下的对流层,但磁场的观测资料主要来自光球。

2. 宇宙到处都是等离子体

阿尔文在提出银河系中处处有磁场的假设不久,又提出星际空间充满着等离子体。我们熟悉物质有固体、液体、气体这三种状态。等离子体是物质的第四种状态。物质变为等离子体状态是在温度非常高的情况下出现的。当气体温度增加到几千、上万度或者受到强烈的紫外线、X射线、γ 射线的照射后,原子核外的电子因获得足够的能量摆脱原子核的束缚成为自由电子,也就是原子被电离了。由带负电的自由电子和带正电的原子核以及一部分中性原子组成的物质就是等离子体。因正负电荷密度几乎相等,在从整体上看等离子体呈现电中性。生活中见到的日光灯或霓虹灯灯管中就充满着人工方法制造的低温等离子体。

天体物理学和空间物理学的研究对象中,都涉及等离子体。太阳的表面温度约为5800 K,处在这个温度的物质只能部分电离。但是到了太阳内部,越向里去,温度越高,电离程度越高,在太阳核心区的物质则是100%地被电离,也就是完全的等离子体。可以说,太阳和其它恒星是一个个温度很高的等离子体气体球。星际气体的温度比较低,但其周围的恒星辐射或高速星风作用也会使其电离而成为等离子体。宇宙中几乎99%的物质都是等离子体。实际上,在天文学的研究中,几乎完全依靠等离子体的辐射来获取知识。

3. 等离子体在磁场中的运动

中性粒子在磁场中不会受任何影响。但是,带电粒子就不一样,它要受到磁场的洛伦兹力的作用,带电粒子的运动又会产生磁场。等离子体是流体就要遵从流体力学的规律,当它在磁场中运动又要遵从电动力学的规律。只用流体力学或只用电动力学都是不能解决像太阳和恒星这样的既有磁场又充满着等离子体的天体上发生的种种现象。一门新兴的磁流体力学应运而生,阿尔文是这门新兴学科的奠基人。

如果一个带电粒子进入磁场时的运动方向与磁力线垂直,洛伦兹力只改变粒子的运动方向,使粒子作匀速圆周运动。当带电粒子的运动方向与磁力线不垂直时,带电粒子在磁场中的运动是螺旋轨道。阿尔文发现等离子体在磁场中运动的一种磁冻结的新现象,也就是带电粒子被固定在磁力线上。等离子体在磁场中运动必然带着磁力线一起运动,相当于磁力线冻结在物质里面了,或者说等离子体粘连在磁力线上了。

4. 磁流体力学波

1942年阿尔文发现了磁流体力学波。在等离子体和磁场冻结在一起的情况下,磁力线存在着张力。就像一根弹拨乐器的弦线一样,在外力的作用下,就发生振动,产生沿弦线方向的横波传播,产生磁流体力学波,又称为阿尔文波。从流体力学理论可以知道,一般的理想流体中是没有横波的。因此在那时几乎所有物理学家都不相信阿尔文波的存在。

1949年他用水银作实验,证实了磁流体力学波的存在。阿尔文理论给出这种波的速度为

$$v_A = \sqrt{B^2/4\pi\rho},$$

该速度是磁场强度(B)和密度(ρ)的函数。磁场越强,密度越小,阿尔文波的速度越大。他在实验中用的磁场是0.1特,结果得到了速度约为75厘米/秒的阿尔文波,与理论计算的完全一致。这之后,阿尔文波才为世人公认。到20世纪40年代中期,磁流体力学的基本理论体系大致构成,磁流体力学波成为磁流体力学成熟的标志性事件。

阿尔文建立和发展起来的磁流体力学是和他从事太阳活动区物理的研究分不开的。早在 1942 年,阿尔文就用阿尔文波来解释太阳黑子的形成和它们的 11 年周期性变化,逐渐发展成为系统的太阳黑子理论。美国太阳物理学家帕克认为,太阳黑子中的对流过程可以激发出阿尔文波,由于阿尔文波沿磁场传播把能量带走,导致黑子内部温度下降,从而解释黑子的温度比较低的观测事实。从那时以后,磁流体力学的基本原理发挥了巨大理论威力,成功地解释了发生在太阳上的一个又一个的观测现象,成为探索太阳规律的支柱理论之一,形成新的"太阳磁流体力学"研究方向。

1948 年阿尔文出版《宇宙动力学》,1963 年又出版《宇宙电动力学》专著。总结了磁流体力学的基本原理和在天体物理学中的应用。

阿尔文因为对宇宙磁流体动力学的建立和发展作出的卓越贡献而荣获 1970 年度诺贝尔物理学奖,这是对他近 40 年科学生涯最公正的评价。瑞典斯德哥尔摩皇家技术学院的几个系科直接起源于他的研究工作,特别是阿尔文实验室已成为举世闻名的磁流体力学研究中心之一。

思考和复习题:

1. 太阳的基本结构如何? 各层的特点如何?
2. 试说明对基尔霍夫三定律的理解。
3. 试评太阳黑子的 11 年周期的发现及其意义。
4. 太阳有哪几种活动现象? 对地球有什么影响?
5. 试评阿尔文荣获 1970 年诺贝尔物理学奖,他在哪些方面值得我们学习?

第六讲

恒星演化与白矮星

宇宙中的万物，也包括恒星在内，都有一个诞生、成长、衰老和死亡的演化过程。以光度为纵坐标，温度或光谱型为横坐标的赫罗图揭示了恒星演化的重要规律，是天文学中的一项重大发现。从星云形成的原始恒星，到主序星，发展到不稳定的红巨星、变星，一直到核燃料燃烧殆尽后演变为致密星，经历了几百万年、几千万年、几亿年，甚至百亿年的岁月。这一演化过程在赫罗图上一目了然。白矮星的发现曾使众多的天文学家和物理学家不能理解和无所适从。当时的物理学原理解释不了这一现象，观测走到了理论前面，促使物理学的发展。年轻的钱德拉塞卡首创的白矮星理论指出白矮星存在一个质量上限，预示着恒星演化的其它结局，虽然那时候并不知道将形成中子星或黑洞。当时引发的一场与当时最著名的天文学家的一场关于白矮星的质量上限的辩论和以后钱德拉塞卡荣获诺贝尔物理学奖的历程成为现代天文学成熟的标记。

一、赫罗图——20世纪最伟大的发现之一

早在20世纪初，1911～1913年丹麦天文学家赫茨普龙和美国天文

学家罗素两个人独立发现揭示恒星演化规律的统计结果,后被命名为赫罗图。这是天文学研究的一项伟大的发现,天文学家最有用的关系图之一,成为恒星天文学最重要的基础。这一发现非常简洁,是以恒星的光度为纵坐标,以温度或光谱型为横坐标的统计结果(见图 6-1)。

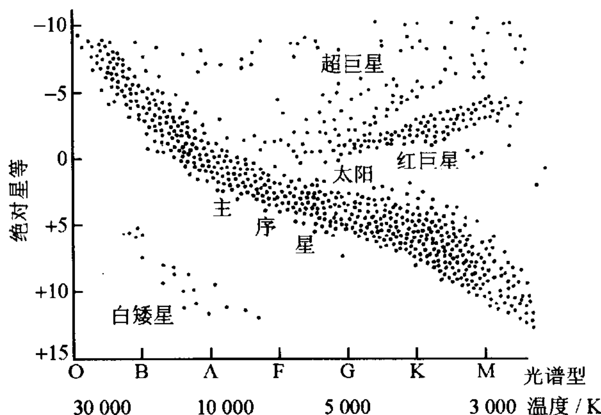


图 6-1 恒星演化赫罗图

1. 恒星的光度

在银河系中有千亿颗恒星,它们的特性千差万别。赫罗图纵坐标是恒星光度,是恒星每秒钟辐射出的能量,以焦耳/秒为单位。天文学家把光度大的恒星叫做巨星,光度比巨星更强的叫超巨星,光度小的称为矮星。恰好,光度大的巨星,体积也大,光度小的矮星,体积也小。恒星之间的光度差别非常大。设想把所有的天体都放到距离我们 10 秒差距的地方,这时它们的视星等叫做绝对星等。因此绝对星等表示了天体的真实发光强度,即光度。织女星的绝对星等是 0.5 等,它的光度是太阳的 50 倍。超巨星"天津四"的绝对星等大约是 -7.2 等,其光度比太阳强五万多倍。还有一颗在星空中极不起眼的天蝎座 ζ,视星等只有 3.8 等,但它的绝对星等是 -9.4 等,它的光度几乎是太阳光度的 50 万倍。最强的恒星的光度甚至是太阳的 100 万倍。太阳是一颗黄色的矮星,相比之下光度比较弱。但还有比它更弱的矮星。如著名的天狼星伴星是一颗白

矮星，它的光度还不到太阳的万分之一。还有绝对星等在20等左右的暗弱恒星，它们的光度大约仅为太阳的40万分之一到50万分之一。

恒星的大小相差很大。太阳的直径是地球的109倍。巨星直径要比太阳大几十到几百倍。至于超巨星，以红超巨星参宿四为例，其直径是太阳的900倍。有一叫柱一的双星，其中之一的直径大约是太阳的2000～3000倍。比太阳小的恒星也有很多，其中最突出的属白矮星和中子星了。白矮星的直径只有几千千米，和地球差不多。而中子星的直径则只有20千米。恒星的体积相差极大，而它们的质量却差别不太大。大多数恒星的质量在太阳质量的0.5到5倍之间。质量最大的恒星，其质量能比太阳大几十倍。质量最小的恒星，其质量也有太阳质量的几十分之一。

2. 光谱型

赫罗图横坐标参数是恒星光谱型，光谱型、表面温度和色指数之间存在对应的关系，有时也用恒星的表面温度或色指数表示。恒星是一团炽热的被自身引力束缚的气体，它们的中心区域密度和温度都特别高，足以产生热核反应。恒星表面的高温使之发射类似黑体辐射一样的光谱。黑体在很宽的频率范围内都有辐射，因此称为连续谱。光谱曲线的峰值和形状由物体的温度决定。不同频率的光，其颜色不同。恒星的颜色多种多样，恒星的颜色代表了它们表面的温度。红色星的温度低，只有3000 K，黄色星的表面温度约6000 K，白色星的温度约为10 000～20 000 K，蓝色星的温度最高，有30 000～100 000 K。

除了连续谱以外，还有两种线状谱，分别是发射线和吸收线。它们是叠加在连续谱上的亮线和暗线。炽热到一定程度的稀薄气体原子会发射特定频率的光子，形成发射线；而较冷的稀薄气体的原子则可能吸收通过它的连续光谱中的特定频率的光子而形成暗的吸收线。不同的物质会有不同的吸收或发射线。测量这些谱线，可以得到恒星的化学成分的信息。从地球实验室的光谱实验中得知，氢、氧、碳等轻元素的光谱线只有几条谱线在可见光区，绝大部分谱线都在紫外，肉眼看不见。较

重的元素的谱线大部分在可见光区。恒星的外层,如太阳的光球,其温度远比内层低,因此其中的物质就会对内部来的连续谱辐射进行选择吸收,而形成许多暗黑的吸收线。在恒星表面大气中的某些元素的原子产生发射线要求温度相当高,一般不容易达到,因此有发射线的恒星比较少。有吸收线的恒星则很普遍,只不过有的多些有的少些。也有一些恒星光谱呈现有分子带谱线。天文学家根据恒星的吸收线光谱特征来进行分类。最著名的分类法是由哈佛大学天文台的天文学家提出的,称为哈佛分类法。他们根据 240 000 颗恒星的吸收光谱资料,把它们分为七大类:O 型、B 型、A 型、F 型、G 型、K 型和 M 型,在 G 型和 K 型中,又有三个子型,即 R 型、N 型和 S 型。

O 型为蓝星;B 型为蓝白星;A 型为白星;F 型为黄白星;G 型为黄星;K 型为橙红星;M 型为红星。这种光谱型分类的顺序恰好是恒星表面温度从高到低的序列。对应的表面温度分别是:O 型为 40 000~25 000 K; B 型为 25 000~12 000 K; A 型为 11 500~7700 K; F 型为 7600~6100 K; G 型为 6000~5000 K; K 型为 4900~3700 K; M 型为 3600~2600 K。天文学家曾认为,这一序列代表了恒星的从高温到低温的演化,把 O 型和 B 型称为早型星,把 K 型和 M 型称为晚型星。后来知道,这个看法并不正确。

3. 赫罗图揭示的恒星演化规律

从赫罗图上可以看出,恒星主要集中在四个区域。第一个区域为主序星区:绝大多数恒星分布在从左上到右下的一条带上。这个带上的恒星,有效温度愈高的,光度就愈大。这些星被称为主序星,又称矮星。我们熟悉的太阳、牛郎、织女等都是主序星。第二个区域在主序星右上方:这些恒星的温度和某些主序星的一样,但光度却高得多,因此称之为巨星或超巨星。像北极星(小熊座 α)、大角(牧夫座 α)属于巨星,心宿二(天蝎座 α)则为著名的超巨星。第三个区域在主序星左下方:是一些温度高而光度低的白矮星,以及其它低光度恒星,如宁静新星和行星状星云的核(已经公认为白矮星)。天狼 B(即天狼星的伴星)就是最亮的白矮星。

第四个区域位于赫罗图上一个很右的位置:温度非常冰冷的星际云在最右边,当星际云收缩,它会变得越来越热,在赫罗图上的位置亦会向左移动。由星际云形成的原恒星也在赫罗图的右边。赫罗图是由恒星的光学观测数据构成的,因此中子星和黑洞不能在赫罗图上显现。在赫茨普龙和罗素最初给出的赫罗图中,没有第三和第四个区域,因为那时还没有发现白矮星,也没有讨论恒星的形成。

赫罗图在恒星演化的研究中十分重要。天文学家根据赫罗图描绘了恒星从诞生、成长到衰亡的演化路径,并从理论上给出恒星从诞生到主序星、红巨星、变星、新星(超新星)、致密星(白矮星或中子星或黑洞)的演化机制和模型。这是人类认识恒星世界奥秘的一个重大突破。

二、恒星的视星等、绝对星等和距离

我们的肉眼和望远镜不能直接测量出恒星的光度,只能得到视亮度或视星等。要获得表征恒星光度的绝对星等必须知道恒星的距离。不知道绝对星等就无从研究恒星的演化。因此,距离的测定显得更加重要。恒星的视星等、绝对星等和距离等基本的参数成为天文学最基本的知识。

1. 视星等

晴朗的夜晚,点点繁星,有明有暗。天文学家用"视星等"来区分它们的明亮程度。公元前 2 世纪古希腊天文学家伊巴谷首先定义了恒星的视星等。他把用肉眼观看到的明暗程度分成 6 个等级,眼睛看起来最为明亮的恒星定为 1 等星,比 1 等星稍暗一些的为 2 等星,再暗一些的为 3 等星,依此类推,最后把眼睛刚好能看到的恒星定为 6 等星。星的亮度越大,星等越小。肉眼能看见的恒星全天共约有 6000 多颗。天上的恒星是越亮的越少,越暗的越多。全天 1 等以上的亮星共 21 颗,2 等星 45 颗,3 等星 134 颗,4 等星 458 颗,5 等星 1476 颗,6 等星 4840 颗,总共 6974 颗。再暗的星只能应用光学望远镜才能观测,图 6-2 给出几个典

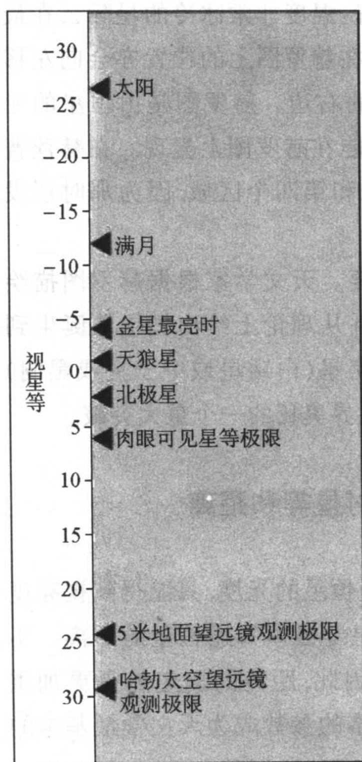


图 6-2 天体视星等和观测极限星等的比较

型天体的视星等和人眼、望远镜的可观测星等极限。

古时关于星等的定义一直沿用至今。视星等是按照人的肉眼对亮度的感受划分的等级，它与实际亮度不是线性关系，而是服从对数规律，即普森公式($m=-2.5\times \lg E$)。m 是视星等，当视星等为 0 等时，亮度 $E=1$。可以求得，相邻 2 个星等的亮度差 2.512 倍，1 等星比 6 等星大约亮 100 倍。

天文学上的视星等和物理学上的照度有确定的关系。照度即物体被照亮的程度，单位是勒[克斯]。1 勒相当于视星等 -13.98 等。因此恒星的视星等不再局限于 1～6 等了，可以用仪器精确测量天体的照度而得到视星等。现在知道太阳的视星等是 -26.7 等，满月的视星等为 -12.7 等，天狼星为 -1.45 等，非常暗的星则可达 27 等。

用照相底片代替肉眼观测，星光亮度越大，照相底片感光黑度越浓。按照相底片上感光强度定出的星等叫照相星等，照相底片对红光不敏感，对蓝光敏感。用照相底片测定星等，红星显得暗，星等大；蓝星显得亮，星等小。

2. 绝对星等

恒星发出的光到达观测者的强度与距离平方成反比(图 6-3)，恒星离我们越远，看起来越暗。因此，视星等不能代表恒星的真实亮度。为了比较恒星的真实亮度，需要把它们都放到同一个位置上来比较谁亮谁

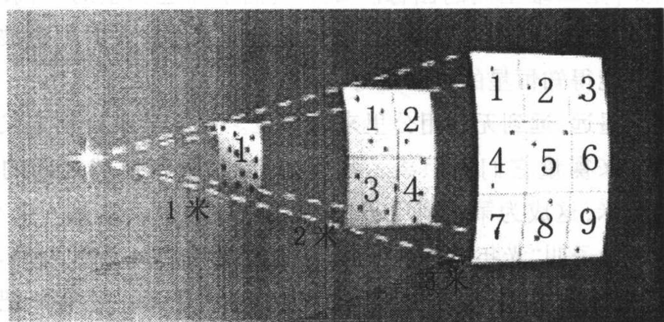


图 6-3　亮度与距离的关系示意图。距离越远，能量(方块中的黑点表示)越分散，强度就越弱。

暗，为此天文学家引入绝对星等的概念。绝对星等是把恒星都移到 10 秒差距(32.6 光年)处时的视星等。绝对星等显示恒星的真实光度，亦即它一秒钟内辐射的能量。绝对星等的概念可以推广到星团和星系等其它天体。测量绝对星等需要知道恒星的距离。太阳的视亮度是冠军，但如果把太阳放到离地球 10 秒差距的地方，它只有 4.8 星等的亮度。它将是一颗肉眼看起来相当暗的星。

用光度表示天体的真正亮度比较方便，不仅适用于光学波段，也适用于其它波段，如红外、紫外、射电、X 射线及 γ 射线波段。恒星的光度与绝对星等都是表征恒星辐射能力的参量。绝对星等相差 1 等，光度相差 2.512 倍。绝对星等 1 等星的光度是绝对星等 6 等星的 100 倍。这和视星等与视亮度之间的关系是类似的。

绝对星等 M、视星等 m 及恒星距离 r 之间的关系是：

$$M = m + 5 - 5\ln r。$$

恒星的距离以秒差距为单位。由视星等和距离可以估计恒星的绝对星等。因此必须知道恒星的距离，测量恒星距离的方法有很多种，我们将在不同的章节介绍。

3. 恒星距离的测定

我们生活在一个三维空间。我们肉眼所看到的星座则是恒星在天

球上的投影，是二维空间的图像。如果我们不知道恒星的距离，那么就不能知道恒星在空间的真实分布、它们的运动速度和发射电磁波的真实强度。也不能得知恒星的绝对星等。

恒星之遥远，远到无法用公里来做单位。天文学家特别定义了几把不同的尺子来衡量它们的距离。我们知道，太阳和地球之间的距离是 1.5×10^8 千米，这成为第一把尺子，称为“天文单位”。这是一把小尺子，更大一点的尺子叫“光年”。光是宇宙中速度最快的，1 秒钟大约走 30 万千米，可以绕地球 7 圈多。光 1 年要走大约 10^{13} 千米。还有一把更大一点的尺子叫“秒差距”。1 秒差距等于 3.26 光年。除了太阳以外，离我们最近的恒星是半人马座的比邻星，距离是 4 光年多。人们比较熟悉的牛郎星为 16 光年，织女星是 25 光年。北极星的距离则为 680 光年。在银河系中最远的恒星离我们大约 6 万光年。河外星系中的恒星，离我们则有几亿甚至一百多亿光年。

在地面上可以利用三角的方法测量一个远处物体的距离。譬如，我们要测量山顶上的一座塔离我们的距离。可以先确定两个已知距离的测量点，然后分别从这两个点去看塔顶的方向，两个方向的夹角就叫做“视差”角。在一个等腰三角形中，知道顶角和对边，就可以求出它的高，也就是塔顶到我们的距离。

测量近处的恒星，也可以用三角法。只是不能用地面上的基线，因为太短了，充其量也只有几千千米。恰好，地球绕太阳作轨道运动，这个轨道平面的直径可长了，达到 3 亿千米。我们把地球绕太阳运动轨道的直径作为已知距离的基线，地球绕行太阳半周是半年，正好从地球轨道直径的这一端跑到另一端。这样，隔半年两次测量恒星的方向，测出它的“视差”角，便可以计算出恒星的距离(见图 6-4)。更远处的恒星，因为它们的视差角太小了，无法测准，只能寻找其它方法。恒星距离非常遥远，视差角极其微小，哥白尼在创立日心学说时曾尝试测量恒星视差，以证明地球围绕太阳运转，但未成功。在哥白尼之后经过了三百来年的努力，1838 年才测量出第 1 颗恒星的视差：天鹅座 61 的视差为 0.31 角秒，它相当于从 12 公里处看一个 1 分硬币所成的张角。利用三角视差法测

定了大约 7 千颗较近的恒星的距离，绝大多数恒星距离太遥远，它们的视差位移小于 0.001 角秒，根本测量不出这样的小角度。

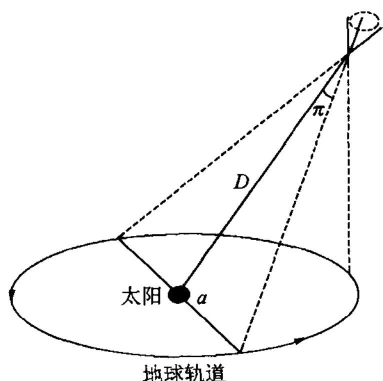


图 6-4　周年视差测距法

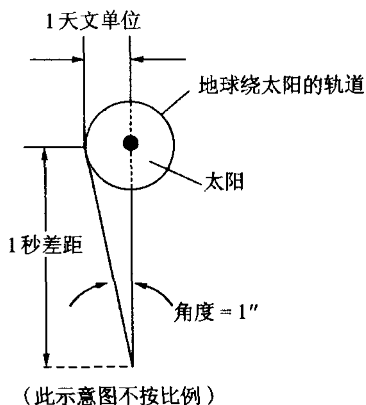


图 6-5　秒差距的定义

由周年视差的测量很容易理解为什么要用秒差距作为距离的单位。秒差距的定义是这样的：对 1 个天文单位的距离(日地距离)，视差为 1 角秒时的距离为 1 秒差距(见图 6-5)。1 秒差距(1 pc)约等于 3.26 光年或 30 万亿千米。恒星距离和恒星视差成反比，恒星距离越远，它的视差越小，恒星越近，视差越大。距离(秒差距) = 1/视差(角)。

三把尺子之间的关系是：

$$1\ \text{AU(天文单位)} = 1.5813\times10^{-5}\ \text{ly(光年)} = 4.8481\times10^{-6}\ \text{pc(秒差距)},$$

$$1\ \text{ly} = 63\,240\ \text{AU} = 0.3066\ \text{pc},$$

$$1\ \text{pc} = 206\,265\ \text{AU} \approx 3.26\ \text{ly}。$$

三、恒星的诞生和演化

宇宙万物都有一个诞生、成长、衰老、死亡的演变过程，恒星也不例外。弥漫的星际云在引力作用下逐渐形成原恒星，当原恒星中心的温度升高到能持续不断地发生热核反应以后，恒星进入一个相对稳定的时

期，成为恒星演化史中的主序星阶段。一旦恒星中心处的核燃料耗尽，恒星将会出现不稳定，乃至坍缩、崩溃、爆炸，演化为白矮星、中子星或者黑洞。

1. 原恒星

恒星是由弥漫的星际云在引力作用下逐渐形成的（见图6-6）。有的星际云具有非常大的尺度和质量，直径可达1000光年，10个至1000个太阳质量。但是密度很低，地球大气每立方厘米有3×10^{19}个原子，而星际云每立方厘米只有几十个原子。星际云的成分也与地球大气不同，主要是氢，还有少量氦原子及微量的更复杂原子。没有干扰存在时，星际云可以千载不变。但是，来自星系碰撞、星系所产生的密度波、超新星爆发的激波，或在附近诞生的恒星的干扰会使它们发生变化。一个质量足够大的低温星际云，因自身的引力而不断收缩，导致中心的密度加大，体积缩小。在收缩过程中，大量物质以自由落体运动速度向其质量中心下落，巨大的引力势能转换为动能，导致温度升高，开始辐射红外线。高温产生向外的辐射压力逐步增强与引力相对抗的能力，不再收缩，原恒星就形成了。

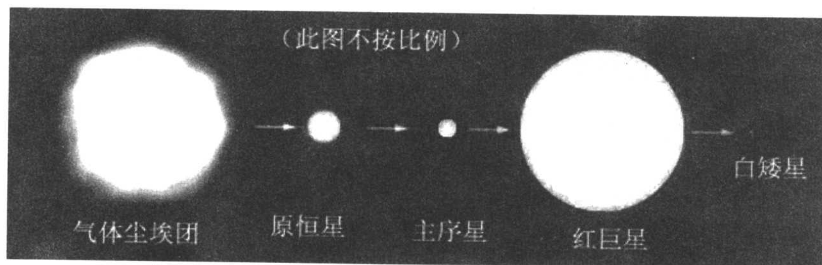


图6-6　恒星形成示意图

2. 主序星

当原恒星中心的温度达到1000万K左右时，氢核聚变为氦核的反应就持续不断地发生。由于核反应产生巨大的辐射能使恒星内部的压

力增强到足以和引力相抗衡，恒星不再收缩。恒星进入一个相对稳定的时期，成为恒星演化史中的主序星阶段。原恒星和主序星的区别和分界线是恒星内部是否发生了持续的热核反应。如果一个星体的质量小于0.08个太阳质量，其核心的温度不可能达到1000万K，也就永远引发不了热核反应，永远不能变为主序星。不同质量恒星演化到主序星的时间取决于恒星的质量，因为恒星质量决定了其内部的温度，质量大的原恒星因为其内部温度比较容易达到产生稳定热核反应开始的条件，所以到达主序星的时间比较短。具有15个太阳质量的原恒星需要16万年，而具有0.5个太阳质量的原恒星则需要1亿万年的时间才能达到主序星。

恒星是相当稳定的炽热气体结构，处于流体静力学平衡状态，满足质量、动量和能量守恒。由热核反应不断产生能量，经辐射转移或对流把能量传输出来。恒星内部的结构主要由它的质量、化学成分和演化阶段来决定。恒星的一生始终处在向内收缩和向外膨胀的矛盾之中，引力使其收缩，辐射压力使其膨胀（见图6-7）。某些时候，其中一种力占上风，恒星便呈现为膨胀或收缩。主序星阶段恒星是靠其内部氢核聚变反应提供能源而维持平衡的。由于恒星内部含有大量的氢，氢核聚变反应可进行相当长的时间，所以恒星在主序星阶段停留时间很长。质量不同

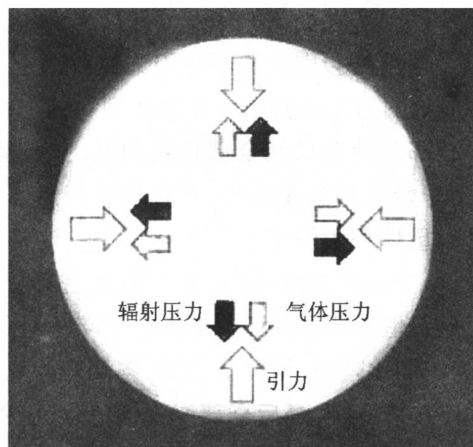


图6-7　恒星稳定的条件：引力＝辐射压力＋气体压力

的恒星在主序星阶段的时间很不相同。质量愈大的恒星氢消耗得愈快，在主序星阶段停留的时间就愈短，见图 6-8。超过 100 个太阳质量的恒星不稳定，要分解。宇宙中没有小于 0.08 个太阳质量的恒星，也没有大于 100 个太阳质量的恒星。

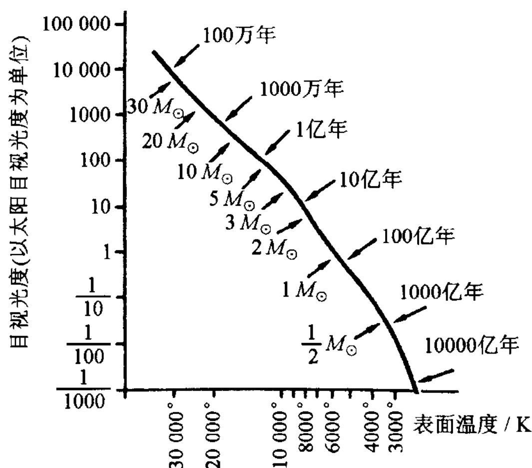


图 6-8　恒星质量对演化的影响(赫罗图)，图中 $M_\odot$表示太阳质量

3. 恒星晚期

一旦核能耗尽，恒星将会因抗衡不住引力而收缩下去，直到出现一种新的、更强大的向外的力来抗衡引力才能达到新的平衡。过了主序星阶段之后，恒星中心部分的氢已经全部转化为氦，中心部分以外的区域由于温度的增高又开始氢核聚变反应，并且核反应迅速向外层转移，推动外层膨胀，使得恒星体积很快增大上千倍以上。这样，就变成又大又红的红巨星。红巨星中心的温度很高，氦开始发生聚变为碳的核反应。过了红巨星阶段之后，恒星便进入了老年期。老年恒星的重要特点就是不稳定。恒星的老年期比较短，氦聚变为碳，碳聚变为氧和镁，氧聚变为氖和硫，核反应一个接着一个，最后全部变成铁，核反应停止，核能耗尽。这时，恒星内部温度高达 60 亿度，发生极强的中微子辐射，带走大批能量，恒星内部压力大大降低，远远不能与引力相抗衡。引力主宰一切，恒

星就要坍缩，崩溃事在必然。什么力量能使坍缩停止？恒星晚期演化的归宿是什么？在20世纪初的那个年代，天文学家并不清楚。后来的研究认为，在经过了各种演化历史以后，按照它们的质量的大小演化为白矮星、中子星或者黑洞。

四、白矮星的发现及它与红巨星、行星状星云的关系

红巨星、行星状星云和白矮星是恒星演化到晚期的产物，它们之间有着紧密的联系。恒星中心区域的热核反应停止后，就会形成红巨星，红巨星的进一步发展，它的中心部分要坍缩为致密的白矮星，它的外层大气则逐渐地演变为美丽的行星状星云。

1. 白矮星的发现

天狼星是全天最亮的恒星，它有明显的自行，像行星那样在星空中穿梭(见图6-9)。这是它有着很高的运动速度所致。1718年英国天文学家哈雷在测量天狼星位置过程中发现它的自行。1836年德国贝塞尔(F. W. Bessel)发现天狼星的自行呈波浪式的变化，并由此推断天狼星有一颗看不见的伴星，其轨道周期约为50年。1862年美国克拉克用他新研制的望远镜观测天狼星，发现在天狼星附近有一个很小的光点，最后确认它就是天狼星的伴星，称为天狼星B，而天狼星则改称天狼星A。

天狼星B是一颗暗星，其亮度比天狼星A差10个星等，光度相差1万倍。当时，人们以为天狼B星是一颗冷而小的恒星，但是光谱观测表明它是一颗热星，表面温度达到8000 K，与天狼星A的表面温度差不了多少。在温度相同的情况下，光度是和恒星的表面积成正比的，天狼星B如此之暗的原因只能归之为天狼星B的表面积特别小，其直径只比地球的大一点。但是它的质量却和太阳差不多。根据观测到的双星运动的参数值计算得知天狼星A和天狼星B的质量分别是2.4个太阳质量和0.98个太阳质量。由此计算得到天狼星B的平均密度比1吨/厘米^{3}还

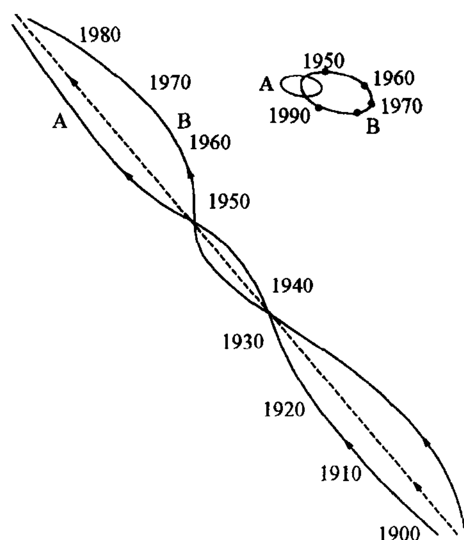


图 6-9 天狼星的自行示意图

要高。当时人们都不敢相信恒星有如此高的密度，成为一个令人困惑的问题。实际上，天狼星 B 是人类发现的第二颗白矮星。在这之前五年的 1910 年，天文学家已经发现波江座 o^2B 这颗暗星是具有很高温度的白矮星，只是没有进行深入的研究。

20 世纪 20 年代，天狼星 B 成为天文学家感兴趣的中心之一。因为在当时物理学原理还不能解释白矮星的高密状态是怎样形成的。白矮星的观测发现走在理论的前面，使得当时的物理学家无言以对。

2. 红巨星和行星状星云

红巨星是主序星演化晚期所经历的一个重要的阶段。当主序星中心部分的氢燃烧完后，都变为氦元素。氦核聚变要求更高的温度，如果恒星的质量不够大，中心温度不满足氦聚变反应的条件，热核反应就暂时停止了。中心部分不能源源不断地提供能量，辐射压大大降低，导致引力大于向外的压力，恒星将会因抗衡不住引力而收缩。收缩的结果又导致中心部分温度大增，同时也加热中心区的外围大气。紧靠恒星中心

部分外围区域由于温度的增高又开始氢核聚变反应，并且核反应迅速向外层转移，推动外层膨胀，使得恒星体积很快增大上千倍以上。图 6-10 给出红巨星与其它恒星大小的比较。由于温度下降，颜色变红。这样，这颗恒星就变成又大又红的红巨星。太阳的未来就是要演变为一颗红巨星。目前，太阳已经在茫茫宇宙中度过了 50 亿年漫漫岁月，再过 50 亿多年，太阳中心部分的氢完全聚变成了氦后，太阳核心外围的氢又开始了聚变为氦的反应，并且从里到外逐步扩展。核聚变所产生的强大辐射压力把太阳外层的大气向外推，太阳就像吹气球似地很快膨胀起来。目前太阳的半径是 70 万千米，到那时会胀到大约 7000 万千米。在膨胀的过程中，太阳外层大气的温度逐渐下降，发出的光也逐渐变为红色，太阳变成了一颗红巨星。在红巨星的照射下，地球上热浪滚滚，人类得天独厚的生存条件将一去不复返了。

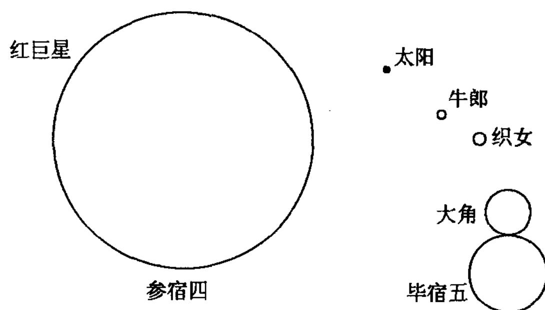


图 6-10　恒星大小的比较

红巨星的寿命大约为 10 亿年。10 亿年后，红巨星就会变成白矮星和围绕在白矮星周围的行星状星云。行星状星云是一种异常美丽的天体。

行星状星云大都比较暗，只有大型光学望远镜才能看清楚。最近由哈勃空间望远镜拍摄了一批行星状星云的照片，本书的彩页选登了其中的 4 幅，见彩图 23—26。在星云中心大都有一颗温度比较高的恒星（白矮星），星云呈现围绕中心星对称的圆环状或圆盘状。星云在不断地膨胀，速度约为10～50 千米/秒。星云的内部物质稀薄，而边缘则比较稠密。

由加拿大籍著名华人天文学家郭新提出的一种行星状星云形成的理论模型,成为目前流行的观点。按他本人的说法,这叫"铲雪"理论。在红巨星阶段,大气逃离速度比较慢,约为10千米/秒,经过几百万年把红巨星的大部分大气带走,使中心星裸露出来。由于中心星是致密的白矮星,它们的星风速度很快,可达2000千米/秒,很快就能赶上红巨星以前跑掉的物质。速度快的星风追赶上以前的慢速度星风,产生了一种铲雪的效应,形成行星状星云的气壳和复杂的结构(图6-11)。最著名的南天极附近的沙漏星云,展现出一环套一环的复杂结构(见彩图23)。

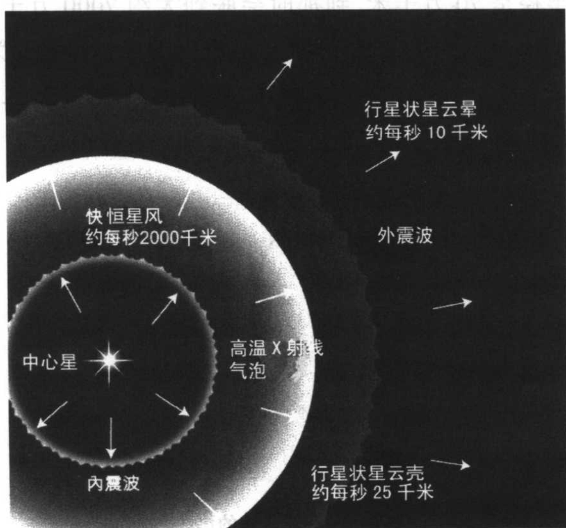


图6-11 行星状星云形成的理论模型

五、白矮星的形成

白矮星这个名字是爱丁顿(A.S. Eddington)于1924年首先提出的,"白"是指温度高,呈白色;"矮"是指"个儿小",光度低。他认为白矮星内部的温度非常高,原子都被电离成电子和原子核,这些粒子的体积比原子小得多。由于高度压缩,天狼星伴星的直径变得比行星天王星要小,

其密度却高达 53 千克/厘米^3。正因为它的表面积太小，所以往外辐射的总能量就比普通恒星少得多。爱丁顿是基于经典物理理论来解释白矮星的，他认为原子被电离为原子核和电子，这些粒子之间仍然有很大的间隙，仍可采用理想气体物态方程来处理白矮星的内部结构问题。这显然是不正确的。

爱丁顿正确地指出天狼星 B 是致密的白矮星，在当时并没有得到多少天文学家的支持。他为了进一步确认天狼星 B 为致密星，想到了爱因斯坦广义相对论关于引力红移的预言。根据广义相对论，在强引力场中谱线会产生红移。太阳表面引力不太强，只比地球表面上的引力大 28 倍，不足以产生明显的引力红移。但是天狼星 B 很小，其表面引力很大，是太阳的 840 倍，引力红移就比较明显了。爱丁顿建议正在研究天狼星 B 的亚当斯进一步分析它的光谱，结果不出爱丁顿的预料，亚当斯于 1925 年测出了这种红移，而且红移量与用爱因斯坦理论计算得到的结果一样。这一观测实验证实了天狼星 B 的确是一颗质量大而体积小的致密星。从此，人们不再怀疑白矮星的存在了。

我们知道，原子是由原子核和核外的电子组成的。原子的全部正电荷和几乎全部的质量都集中在原子核里。带负电的电子在原子核外绕核旋转。原子很小，其直径的数量级是 10^{-8}厘米，而原子核更小，只有 10^{-13}厘米的数量级。当恒星内部的热核反应停止以后，辐射压大大降低，远远不能与引力相抗衡，必然导致恒星坍缩，温度升高，密度加大。高温使得原子核外的电子全部电离，变成赤裸裸的原子核，所有电子都成为自由电子。坍缩的结果使它的密度提高了 10^4 到 10^5 倍，导致恒星的直径大大地减小，变成与行星差不多大小。

在密度非常高的情况下，电子、质子和中子气体已不能用经典物理理论规律来解释。它们遵从量子力学的规律而被称为简并气体。在经典物理中，粒子和波是完全不同的，每个粒子具有确定的位置和速度。但是，在量子力学中，光是波动又是粒子，这就是波粒二象性。一切粒子，包括电子、质子和中子也有波动性。粒子的位置和速度遵从"测不准关系"，也就是不能同时确定粒子的位置和动量，但是它们的乘积却等于

一个常量。粒子所占的体积越小，它的动量就越大。由于坍缩恒星的密度大大地增加，必然导致原子核外的电子具有很大的动量。

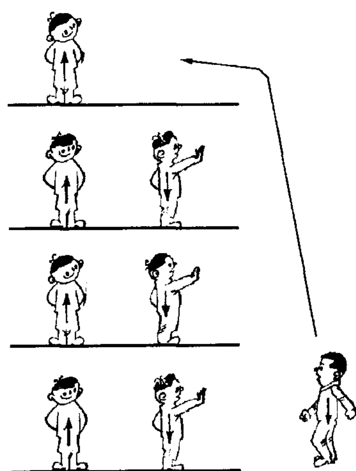


图 6-12 泡利原理图解

量子力学还有一个重要的“泡利不相容原理”。这个原理说的是，电子的能量状态是不连续的，只能取某些特定的值。同一个状态，只能允许一个电子占有。电子能量从低向高排列，低能态的占满了，就只能到高能态去(如图 6-12)。所以，当电子密度很高时，必然有很多电子处在高能态，具有非常高的速度，这种电子称为简并电子。在高密状态，电子具有非常高的速度并不是因为温度高，而是因为低能态已被别的电子占据了，其它的电子只能跑到高能态上去。因此高能电子数目的多少和温度无关，而仅仅由电子的密度决定。简并电子气压远远高于理想气体的压力，从而可以对抗强大的引力而形成稳定的白矮星。在密度不是特别高的情况下，电子速度比光速要小很多，这时称为非相对论简并电子气，其简并电子气压与密度的 5/3 次方成正比，与温度无关。在非相对论性简并电子气情况下，可以导出白矮星的半径质量关系为 $R \propto M^{-5/3}$，白矮星的质量越大则它的半径越小(如图 6-13)。这与我们所熟悉的正常恒星的半径质量关系完全不同。白矮星保持稳定的秘密就在这里。假如白矮星的质量略有增加，引力当然也随之增加，这时恒星的半径减小，使密度增加，导致简并电子气压力增加，所以仍然维持平衡状态。

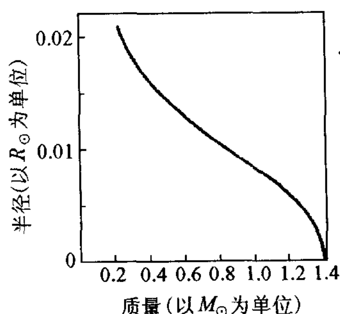


图 6-13 白矮星的质量-半径关系
($M_\odot$，$R_\odot$表示太阳质量和半径)

但是当密度更高时，情况就发生了

变化。按照“泡利不相容原理”,会把非常多的简并电子推到更高的能级上,其速度接近光速而成为相对论性电子。相对论简并电子气的物态方程发生了变化,简并电子气压仍和温度无关,但却与密度的4/3次方成正比。这时,白矮星的质量与半径的关系消失了。质量的变化不会引起半径的变化,这样就不可能通过白矮星的半径的自动调节来达到平衡。质量增加必然导致引力增加,使恒星的坍缩继续下去,这样就不可能形成稳定的白矮星。钱德拉塞卡计算出稳定的白矮星的质量上限为1.44个太阳质量。这是一项天文学上重要的成就,成为钱德拉塞卡获得诺贝尔物理学奖的原因之一。

六、钱德拉塞卡和白矮星质量上限

钱德拉塞卡1910年10月19日出生于巴基斯坦的拉合尔,1916年随全家迁居印度的马德拉斯,1930年毕业于马德拉斯大学。在他大学学习的那个年代正值物理学从经典到近代物理学转变的时期。新的理论,新的学说和新的概念一个接一个地出现。1915年爱因斯坦发表了广义相对论;1911年,卢瑟福提出了原子模型;1925年春,年仅25岁的泡利提出新的物理学原理——不相容原理,他为此在1945年荣获诺贝尔物理学奖;20年代中期,诞生了量子统计学。这些物理学最新的进展不可能及时成为大学教科书的内容,年轻的大学生钱德拉塞卡如饥似渴地自学这些近代物理学的新成就。1927年暑假期间,17岁的钱德拉塞卡就阅读了处在物理学前沿的物理学家海森伯、狄拉克、泡利等人的论文和索末菲的名著。



图6-14　美籍印度天文学家钱德拉塞卡

1928年,德国物理学家索末菲来到他们大学讲授有关量子统计学等

物理学的进展,钱德拉塞卡听了后,立即尝试把量子统计的理论应用到白矮星上,得到很有意义的结果。他发现简并电子的压力和密度的3次方成正比,而不是理想气体那样的只和密度的一次方成正比。特别有意思的是,他的计算结果表明,白矮星的半径与质量的立方根成反比。这是他研究白矮星的习作,虽有不完善的地方,但其结论基本上是对的。他18岁时候就有一篇题为"康普顿散射和新统计学"的论文发表在1928年的《皇家学会论文集》上。这一论文引起剑桥大学老师的兴趣,为他去剑桥大学攻读理论物理牵了线。1930年他被剑桥大学录取为研究生。

1934年他把研究白矮星的论文提交给英国皇家天文学会。1935年1月英国皇家天文学会召开了学术会议,他获得报告的机会。为了准备好这次报告,在会前的几个月里,他获得与当时最有名气的天文学大师爱丁顿讨论的机会,大约每周有两次讨论。爱丁顿是恒星结构理论的奠基人,也是最早提出白矮星看法的学者。钱德拉塞卡这个年仅24岁的青年能与大师讨论当然是很荣幸的。

钱德拉塞卡的报告讨论了一个基本问题:当恒星的核燃料烧尽了以后,将会发生什么?当一颗恒星的气体被压缩直至它们的电子以接近光速运动时(这被称之为相对论性简并状态),会发生什么现象?他的结论是:"一颗质量大的星体不会停留在白矮星阶段,我们应该考虑其它的可能性。"他相信自己的研究结果是一个重要而且惊人的发现,他期望得到爱丁顿的支持。没想到,爱丁顿也有一篇相同命题、完全针对钱德拉塞卡论文的报告。爱丁顿宣称钱德拉塞卡的理论"全盘皆错","根本不存在什么相对论性简并。""钱德拉塞卡的白矮星质量上限"的结论"离奇古怪",他相信"一定有一条自然法则阻止星体按这种荒谬的方法演化。"他甚至当场把钱德拉塞卡的论文撕成两半。

这真是晴天霹雳的一击,会议主席又不给钱德拉塞卡答辩的机会,反而要求他感谢爱丁顿的批评。同年7月,国际天文学会在巴黎召开代表大会,钱德拉塞卡和爱丁顿又见面了。在会上,爱丁顿主动出击又一次激烈地批评钱德拉塞卡的白矮星理论。钱德拉塞卡仍然没有得到在会上申辩的机会。

两次遭受学术权威的封杀，但钱德拉塞卡并不屈服，坚信自己的理论是正确的。他知道，他和爱丁顿之间争论的焦点不是天文问题，而是要不要用现代物理学的相对论、量子统计来解决像白矮星这样的致密星的内部结构问题。爱丁顿的错误在于坚持经典物理学原则，不承认相对论简并性。钱德拉塞卡转向物理学界去征求意见，争取支持。他首先得到了著名物理学家玻尔及在玻尔那里工作的罗森费尔德的支持，他们认为，爱丁顿的理论违反了泡利原理，因而必然是错误的。钱德拉塞卡又向泡利请教，同样得到坚决的支持。渐渐地，他获得的支持越来越多，情况发生了变化。

1939年8月，国际天文学会在巴黎召开学术会议专门讨论白矮星和超新星问题。钱德拉塞卡终于获得机会在大会上作报告，他公开指出爱丁顿理论的错误所在，赢得了许多人的支持。这场争论推动了天体物理学的发展。

虽然钱德拉塞卡受到爱丁顿错误而且傲慢的封杀，也使得他不可能在英国找到一个满意的职位。但他并不忌恨爱丁顿，在以后的学术交流中还与他建立了友好的关系，经常通信交流。在爱丁顿逝世时，他出席追悼会，发表了感情真挚的悼词。他还出版一本题为《爱丁顿》的小册子，纪念爱丁顿百年诞辰。

很显然，一个新理论总是需要时间来验证它的正确性，天文学的理论更需要用天文观测来检验。目前，已经发现白矮星逾千颗，它们的质量都没有超过1.4个太阳质量的钱德拉塞卡极限，没有一个例外。而且，它们的质量和半径关系完全遵从钱德拉塞卡推算出的理论曲线。

在1935年，无论是钱德拉塞卡本人还是其它科学家都还不知道质量超过钱德拉塞卡极限的老年恒星的演化归宿是什么。现已公认，质量比较大的老年恒星最终将演化为密度比白矮星更大的天体——中子星或者黑洞。但是，要不是当时的学术权威爱丁顿极力反对，钱德拉塞卡关于白矮星质量上限的研究的进一步发展就必然要回答超过白矮星质量上限的恒星的归宿。钱德拉塞卡回忆这场争论时说，“如果爱丁顿当时承认了黑洞理论，他将会使这整个领域变成一个引人注目的研究领

域，黑洞的许多性质将会提前 20 到 30 年被人们发现，不难想像，理论天文学将会大不相同。”

钱德拉塞卡的研究风格是独特的。他不是一辈子盯着一个他所熟悉的、已在学术界具有权威的领域。而是当他在某一领域的课题取得系统性的成果以后，写成一本专著，然后，强迫自己放弃已经驾轻就熟的课题，重新寻找天体物理学领域里另一个完全不同的课题。这种被人们称为“钱德拉塞卡风格”让其它天文学家们无法理解，也无法效仿。这种风格需要他投入大量的时间和精力，意味着他将几十年如一日，每天从早晨 6 点钟一直干到半夜。到了 63 岁，钱德拉塞卡又换了课题，换了他年轻时研究工作起步时的课题，专注研究一个旋转的黑洞对外来的引力波、电磁波等的扰动的影响。一干就是 8 年，完成黑洞课题研究时已是 71 岁的高龄，几乎是这个领域里其它同行年龄的两倍，而他依然取得独创性的成果。

他把自己的研究风格比喻为艺术家对待自己的雕塑作品的态度，你一旦完成就不想再在这儿或那儿进一步修饰它。他对天体物理学的贡献是全面的，不仅在恒星内部结构理论方面，做出了像白矮星理论这样的开创性的成果，写了《恒星结构研究导论》这部巨作，还在恒星和行星大气的辐射转移理论、星系动力学、等离子体天体物理学、宇宙磁流体力学和相对论天体物理学等方面都有重要贡献。而且，各阶段的研究成果都总结成专著出版。前后有 7 部之多。从 1989 年到 1991 年，芝加哥大学出版社还专门为钱德拉塞卡出版了 6 卷本的《论文选》。

钱德拉塞卡在年轻的时候就闻名于世，一生获得许多荣誉和奖励。最令他欣慰的是，在他 73 岁高龄时荣获 1983 年度诺贝尔物理学奖。钱德拉塞卡教授于 1995 年去世，享年 85 岁。

思考和复习题：

1. 试叙述恒星的视星等和绝对星等的定义。
2. 试说明天体距离的三把尺子：天文单位、光年和秒差距，及它们之间的关系。
3. 什么是赫罗图？为什么它在天文学研究上具有重要的地位？

4. 天狼星B是怎样被证认为白矮星的?
5. 试叙述原恒星、主序星、红巨星和白矮星的演化过程。
6. 评述钱德拉塞卡与爱丁顿的争论和他荣获诺贝尔物理学奖，你认为他最值得我们学习的是什么?

第七讲

恒星能源、元素合成和太阳中微子之谜

恒星能源、元素合成和太阳中微子之谜是现代天文学研究领域三个热点课题，都属于核天体物理的研究领域。太阳和恒星能量来源的研究始于20世纪30年代，美国物理学家贝特首先正确地提出，太阳中心温度极高，太阳核心的氢核聚变生成氦核，释放出大量的能量，成为太阳光和热的源泉。宇宙中存在的各种各样的物质都是由各种元素组成。恒星内部发生的种种核反应产生了巨大的能量，也产生了众多元素。美国核物理学家福勒从事与元素合成有关的核反应实验和理论研究，被誉为这一领域的先驱者和核天体物理学的奠基人，他与另外两位天文学家合作提出的B^2FH理论全面地解决了恒星上众多元素形成的途径，他也为此荣获1983年度的诺贝尔物理学奖。太阳上的热核反应过程产生了大量的中微子，美国的雷蒙德·戴维斯和日本的小柴昌俊首先研制特殊的设备观测到太阳中微子，开创了中微子天文学。他们于2002年共同荣获诺贝尔物理学奖。

一、丰富的物质世界

认识我们的物质世界，不仅要从宏观上研究小到地球上的一切物体，大到地球、恒星、银河系、星系团，乃至宇宙，还要研究构成世界万物的分子、原子以及基本粒子的微观世界。不了解微观世界的物理规律就不可能全面地认识我们的物质世界。

1．原子和原子核

分子是表征物质特性的最小单元，分子由原子组成的，原子又由质子、中子和电子组成。图7-1给出原子等的尺度。每种原子对应一种化学元素。我们今天的物质世界之所以丰富多彩，是因为有多种多样的元素存在。1897年，物理学家发现电子，并测出电子的电荷和质量。这是人类发现的第一个基本粒子，由于电子的质量极其微小，可猜测是原子组成的一部分。电子带负电，而原子整体是不带电的，因此原子的另一部分必然带正电荷。汤姆孙根据这个想法提出了一个原子模型，认为原子好比是葡萄干面包，电子是葡萄干，嵌在均匀分布的球状正电荷物质内。卢瑟福根据实验提出另一个模型，他认为，正电荷应集中在一个非常小的称为原子核的区域，而电子则在核外围绕核运转，由于电子带负

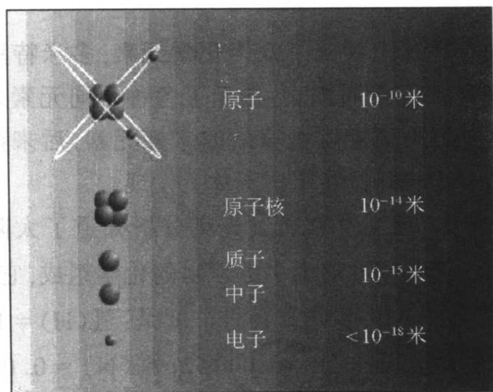


图7-1　原子、原子核和一些基本粒子的尺度

电,原子核带正电,电子只有围绕原子核不停地运转才不会被原子核吸引过去。这个模型被广泛地接受。但这时只知道原子中有一个核,原子的极大部分质量都集中在这个核里。直到1932年发现中子并测出中子的质量与质子的质量相当后,人们才知道,原子核是由质子和中子组成的。质子带正电,质量是电子的1840倍。中子不带电。核中的质子和中子的数目基本上是一半对一半。原子核用符号$^{A}_{Z}X$表示,X为原子核所对应的元素符号,A为质量数,为中子和质子的数目之和,Z为质子数。不同的元素仅仅是它们原子核中的质子数和中子数的不同。具有相同质子数,但中子数不同的原子核形成同位素。以我们最熟悉的几个元素为例,氢的原子核最简单,只有一个质子($^{1}_{1}H$),氦的原子核中有2个质子和2个中子($^{4}_{2}He$),碳和氧原子核就比较复杂,分别为$^{12}_{6}C$和$^{16}_{8}O$。核外的电子数目和核内的质子数相同,因此原子是电中性的。如果我们能够改变原子核中的质子、中子数目,那么就可以把一种元素变为另一种元素。

2. 地球、太阳和宇宙中的元素

宇宙中存在的各种各样的物质都是由各种元素组成的。地球、行星、太阳、恒星、星云以及星际介质中具有各种各样但不尽相同的元素及同位素。这些元素是在宇宙演化的不同阶段和不同的恒星演化过程中产生的。

科学家首先在地球上找到了众多化学元素,多米特里·门捷列夫按照原子量排序发现了元素周期表,揭示了各种不同元素差异所在(见图7-2)。当时在门捷列夫周期表中空缺的未知元素,后来都陆续发现了。地球上所发现的元素也陆续在宇宙天体上发现。

20世纪20年代,天文学家通过光谱分析知道了太阳的物质组成。到40年代,人们已经大体知道大多数恒星的化学组成,它们和太阳的情况很类似。太阳上的元素相对于氢的丰度是:氢(H) = 1.0;氦(He) = 0.38;氧(O) = 0.001;碳(C) = 0.000 52;氮(N) = 0.0001;硅(Si) = 0.000 028;镁(Mg) = 0.000 023;铁(Fe) = 0.000 003;钠(Na) =



周期＼族	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
1	1 H 氢 1.0079 $1s^1$							2 He 氦 4.00260 $1s^2$
2	3 Li 锂 6.94₁ $2s^1$	4 Be 铍 9.01218 $2s^2$	5 B 硼 10.81 $2s^22p^1$	6 C 碳 12.011 $2s^22p^2$	7 N 氮 14.0067 $2s^22p^3$	8 O 氧 15.999₄ $2s^22p^4$	9 F 氟 18.998403 $2s^22p^5$	10 Ne 氖 20.17₉ $2s^22p^6$
3	11 Na 钠 22.98977 $3s^1$	12 Mg 镁 24.305 $3s^2$	13 Al 铝 26.98154 $3s^23p^1$	14 Si 硅 28.085₅ $3s^23p^2$	15 P 磷 30.97376 $3s^23p^3$	16 S 硫 32.06 $3s^23p^4$	17 Cl 氯 35.453 $3s^23p^5$	18 Ar 氩 39.94₈ $3s^23p^6$

图 7-2 门捷列夫和他的元素周期表(部分)

0.000 002；钙(Ca) = 0.000 001 4；镍(Ni) = 0.000 000 83；铬(Cr) = 0.000 000 23。天文学上习惯把氢和氦以外的元素都称为重元素。虽然大多数恒星上的元素丰度都差不多，但也观测到某些种类的恒星的元素丰度差别比较大。如有的恒星碳丰度特别大，有的恒星的锆和锝特别多，有的恒星的锰、铬、磷、硅的含量更丰富，等等。

我们知道，地球上的化学元素种类繁多，宇宙中其它天体上有的地球上都有。人体中也有丰富的元素，不仅有铁、碳、氮、钙、锂、铍、硼、氢，还有微量的比铁更重的元素。

宇宙中最多的元素是氢，氢原子核就是质子。按质量计，它约占宇宙全部看得见的物质的 3/4。第二多的元素是氦，约占全宇宙的 1/4。所有其它元素的总和只占不足百分之一。但是不足百分之一的其它元素种类繁多。这些元素及其丰度是怎样形成的问题一直困扰着物理学家和天文学家。

二、太阳能量来源

太阳和恒星能量来源的研究始于 20 世纪 30 年代，美国物理学家贝特首先提出，太阳中心温度极高，太阳核心的氢核聚变生成氦核，释放出

大量的能量,成为太阳光和热的源泉。这一科学论断为以后的研究所证实。

1. 热核反应

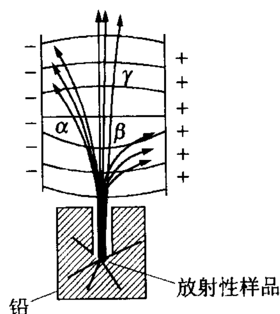


图 7-3 放射性元素的三种射线

人类认识原子核的复杂结构和核反应是从 19 世纪末发现天然放射现象开始的。当时发现放射性元素铀、钋和镭放出 α, β, γ 三种射线(见图 7-3),其中 α 射线是氦的原子核,β 射线是电子,γ 射线是能量很高的光子。从 1911 年开始,物理学家就开始进行原子核的人工转变实验。

原子核是靠强大的核力把众多的质子和中子紧紧地聚集在一起的。核力的作用范围非常小,作用距离只有 10^{-13}厘米,也就是原子核的尺度。原子核是带正电的,同性电荷相斥使它们不可能彼此靠近。要使几个带正电的原子核或质子结合到一起即发生聚变,必须使它们彼此接近到 10^{-13}厘米的核力能起作用的范围内。原子核或质子之间的静电斥力与它们的电量成正比,和它们之间的距离的平方成反比。原子核中的质子越多,斥力也越大。它们越接近,斥力越大。因此实现人工的核反应是非常困难的科学实验。

在地球实验室中,核物理学家利用带电粒子在电场和磁场中受电场力和磁场洛伦兹力的作用可以获得加速度的原理,研制成各种各样的高能带电粒子加速器。最初的加速器可以把质子加速到 700 千电子伏,目前世界上的大型加速器可以把质子加速到 10 000 亿电子伏的能量。加速器使带电粒子获得很高的能量,成为轰击原子核的"炮弹",实现人工原子核反应。

在太阳和恒星内部没有类似的加速器,发生聚变核反应只是靠高温。在高温情况下,原子电离为原子核和电子,同时使部分原子核具有很高的动能,使它们能克服库仑斥力达到可以发生聚变的尺度范围。因

此这种反应又称“热核反应”。人类已成功地实现氢聚变的热核反应,那就是氢弹爆炸。实现氢聚变所需要的极高的温度是由原子弹爆炸提供的。

在太阳或其它与太阳质量差不多的恒星所具有的温度条件下,只能有氢聚变为氦的反应。当氢元素燃烧完以后,太阳将会变为红巨星,最后变成白矮星及行星状星云。由于原子核之间的静电斥力正比于两者所带电荷之乘积,因此不同元素的核反应必须要在不同的温度下才能进行。要使氢同碳、氮、氧等较重的原子核发生反应,需要1500万度以上的高温。至于更重原子核之间的反应,需要的温度当然就更高了。

2. 太阳能源和“质子－质子”链式反应

太阳是一个巨大的火球,它不断地以光和热沐浴着地球。太阳的表面温度大约为5800 K,而中心温度却高达1200万K。它每秒钟向太空辐射的能量为3.8×10^{26}焦耳。太阳的年龄已经超过50亿年。根据地球上的地质资料,在这么长的时间内太阳的辐射能没有明显的变化。这表明,太阳必定有一个长期而稳定的能源。早在19世纪,物理学家就已认识到太阳辐射的能量不可能由通常的化学燃烧过程提供。1926年,英国天文学家爱丁顿认为恒星的能源只能是来自核反应。而当时的物理学家却认为,只有当温度达到几百亿度时,才能发生聚变,而恒星中心区域的温度达不到这样的高温,所以他们认为在恒星内部不可能发生核反应。爱丁顿并不是核物理专家,但他的看法却是对的。后来物理学家终于发现,由于量子力学的隧道效应,在恒星内部温度的条件下是可以发生核反应的。

氢核就是一个质子,氦核中有2个质子和2个中子。在一定条件下中子可以蜕化为质子和电子,质子也可以与电子作用变为中子。如果4个氢核(质子)和2个电子同时互相碰撞,相聚在10^{-13}厘米的范围内,就可以在强大的核力的作用下形成一个氦核。然而,要让6个粒子同时碰撞太难了,根本办不到。质子之间的静电斥力和它们之间的距离的平方成反比。它们越接近,斥力越大,即使它们的速度足以使它们碰撞,6个

粒子同时碰撞的机会也实在是太小了。

氢核聚变为氦核反应的前后要损失质量。根据爱因斯坦的质能定律 $E=mc^2$，质量可以转换为能量。这种“质能转换”现象在力学、化学、热学和电学过程中也有，只是转换过程中的质量亏损太小，一直未被发现，但在原子核反应中却明显地表露出来。由众多中子和质子组成的原子核的质量总是比每个单个质子和中子质量之和要小，也就是由组元构成原子核时会损失质量，亏损的质量变为巨大的能量被释放出来。以氢核聚变为例，4 个氢原子核总质量为 4.0291 原子质量单位，而氦原子核质量为 4.0015 原子质量单位。质量亏损达到 0.0276 原子质量单位，氢聚变为一个氦核就放出 4.12×10^{-12} 焦耳的能量。1 克氢的聚变就会产生 6.21×10^{11} 焦耳，可使 1500 吨水从 0 摄氏度加热到 100 摄氏度。

太阳质量有 4×10^{33} 克，其中 70% 为氢，若其 1/4 聚变为氦，足以维持太阳 170 亿年的寿命。氢聚变为氦的反应只有在 1 千多万度的高温下才能有效地进行。太阳内部的温度是由中心向外逐渐降低的。只有中心附近的一个约为太阳半径的 1/10 的区域可进行氢聚变核反应。太阳产能核心每秒钟产生约 4×10^{26} 焦耳的能量，正好和目前观测到的太阳辐射相当。在太阳或其它和太阳质量差不多的恒星所具有的温度条件下，只能有氢聚变为氦的反应。

氢的同位素氘 ^2_1H，比氢核多了一个中子。氦的原子核中有 2 个质子和 2 个中子（^4_2He），氦的同位素（^3_2He）比氦少了一个中子。不同元素及其同位素之间的区别仅仅是具有不同的质子数和中子数。

太阳上的氢核聚变是由“质子-质子”链式反应过程完成的。这个反应分三个步骤：第一步是两个质子碰撞并发生聚变，形成氢的同位素氘 H^2_1；第二个核反应是由氘和质子碰撞形成氦的同位素氦-3（^3_2He）；最后的核反应是由两个氦-3（^3_2He）碰撞形成氦核（^4_2He），完成由氢核聚变为氦核的反应。三个核反应都是放热反应。在这一连串的反应过程中，有 6 个质子参与，最后形成两个质子、一个氦核、两个中微子、两个正电子和两个光子。同时释放 24.158 电子伏的能量。

福勒在研究生学习阶段，就参加有关质子和氘核的核反应实验研

究,这是“质子—质子”核反应中第二步的反应。为了揭示太阳和恒星上发生的核反应过程,首先要在地球实验室中进行人工核反应实验,然后才能外推到太阳或恒星上去。他们的研究结果表明,在恒星质量不超过1.2个太阳质量的情况下,只有“质子—质子”链式反应能够进行,这成为较小质量恒星“氢燃烧”的惟一方式。氢聚变为氦的“质子—质子”链式反应只需要六七百万度的温度就可以开始“点火”,但是这个反应却只有在1千多万度的高温下才能有效地进行。

与太阳质量相当的恒星中产生热核反应的区域很小,只有最中心区域温度足够高的很小部分。图7-4显示小质量恒星上的核反应情况,图的左边表示恒星演化到红巨星阶段的直径已达火星轨道大小,图右边的核心及之外的两个环是热核反应的不同区域。氢聚变热核反应最先在中心进行,当氢燃烧完后,中心部分要坍缩,导致温度升高而引起氦的燃烧,最后形成碳-氧的核心。在核心外的一圈大气受核心升温的影响,相继开始氢聚变而形成氦元素,外圈则是氢燃烧层。小质量恒星所能产生的元素比较少。

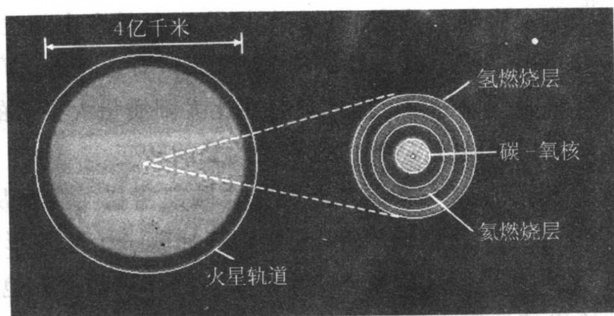


图7-4 小质量恒星上的核反应

三、大质量恒星上的核反应和元素合成

与太阳质量差不多的恒星,只能由“质子—质子”反应使氢核聚变为氦核。氢燃烧完了,这颗恒星的生命也就到了尽头。大质量恒星却还可

以由其它核反应(碳—氮—氧循环)产生氦核,而且还可以进行氦燃烧、碳燃烧、氮燃烧、氧燃烧、硅燃烧,产生大量能量,形成多种元素。

1. "碳—氮—氧循环"过程

美国核物理学家贝特于1936年提出在质量较大的恒星上存在氢聚变为氦的"碳—氮—氧循环"过程,共分几个步骤完成:第一步由碳核($^{12}_{6}C$)和一个氢核(质子)碰撞,质子打入碳核使之变为氮同位素核($^{13}_{7}N$),它是放射性核,很快就放出两个轻粒子(正电子和中微子)形成碳同位素的核($^{13}_{6}C$),由$^{13}_{6}C$和质子反应形成氮核($^{14}_{7}N$);第二步,新的氮核和质子相碰撞形成氧同位素核($^{15}_{8}O$),$^{15}_{8}O$也是放射性核,它放出一个正电子和一个中微子后衰变为氮同位素核($^{15}_{7}N$);最后,由$^{15}_{7}N$和一个质子碰撞形成碳核($^{12}_{6}C$)和氦核($^{4}_{2}He$)。这一系列的反应都是放热反应,因此,只要有足够多的氢核(质子),就可以成为稳定的能源。"碳—氮—氧循环"的结果是四个氢原子核合成一个氦原子核,同时产生两个正电子,两个中微子和三个光子,释放出25.03兆电子伏的能量。参与反应的碳元素在核反应前后没有发生任何改变,而氮、氧同位素只是在中间过程中产生又消失。研究指出,"碳—氮—氧循环"核反应只有在1500万度以上的高温条件下才能有效地进行。因此只有在比太阳质量大很多的恒星上,才由这种核反应提供能源,实现由氢聚变为氦的转变。

福勒从1933年起就在美国加州理工学院凯洛格实验室从事"碳—氮—氧循环"中第一个反应的研究,进行碳核捕获一个氢核形成氮同位素核的实验,还测量了碳核和氮核受质子轰击的作用截面。他们的实验研究定量地给出核反应中所释放出的能量,提供了检验"碳—氮—氧循环"可行性的实验证据。

2. 大质量恒星的"洋葱头"

1946年开始,福勒把研究太阳和恒星上的核物理过程作为新的研究方向。贝特提出的"碳—氮—氧循环"需要有足够的碳元素存在。而贝特从来没有给出恒星中产生碳元素的机制。英国天文学家霍伊尔一直

努力寻求在恒星内合成重元素的途径，遇到的困难也是不能获得足够的碳元素($^{12}_{6}C$)。实在没有办法，他就假定碳元素($^{12}_{6}C$)是以一种激发态形式存在，这样少量的碳元素就够了。很幸运，这个假定被福勒和他的同事们的实验所证实。他们用氘和氮($^{14}_{7}N$)核碰撞，生成激发态的碳($^{12}_{6}C$)和一个氦核。也可以由3个氦核聚变为碳核，“氦燃烧”也会释放出大量的能量，成为某些恒星在氢燃烧完以后的核能源。

图7-5的左边表示恒星演化到红巨星阶段的直径已达木星的轨道。图右边的洋葱头式的许多圆环是恒星演化过程中逐步形成的热核反应区域。依次为铁核、硅燃烧层、氧燃烧层、氮燃烧层、碳燃烧层、氦燃烧层和氢燃烧层。大质量恒星所能产生的元素就比较多了。

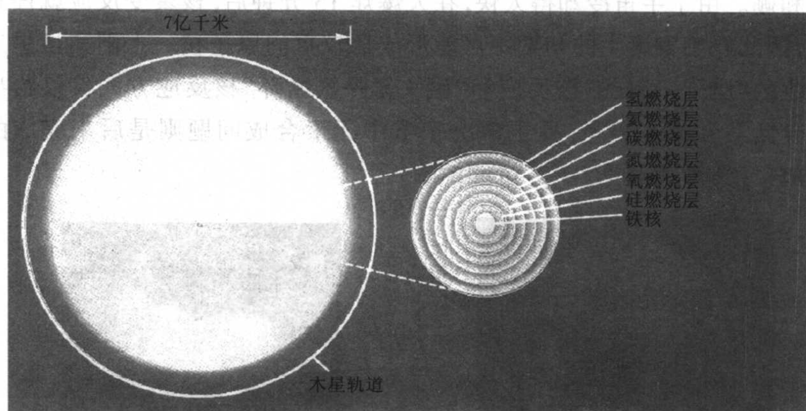


图7-5　大质量恒星上的核反应

太阳和恒星能源的热核反应理论解决了长期以来存在的能源之谜，解决了氦、碳等元素的合成难题，开辟了核天体物理学的新领域。它成为恒星内部结构和恒星演化学的理论基础，无疑是天体物理学乃至整个物理学的一项重大成就。

四、B^2FH元素合成理论

宇宙中存在的各种各样的物质都是由各种元素组成。恒星内部发

生的各种核反应产生了巨大的能量，也产生了众多的元素。美国核物理学家福勒(见图7-6)从事与元素合成有关的核反应实验和理论研究，被誉为这一领域的先驱者和核天体物理学的奠基人，他也为此荣获1983年度的诺贝尔物理学奖。

1. 著名的B^2FH论文

按照大爆炸宇宙模型理论，在大爆炸的极早期的特高温状态下，仅10^{-36}秒就产生了物质世界各种各样的粒子，光子、电子、中微子、质子、中子等。在最初的3分钟后，温度降到10^9 K时很容易生成氦，成为核合成时代，足以把宇宙中大约1/3的物质(氢)变为氦。还能合成少量的锂和硼。由于宇宙冷却得太快，在大爆炸15分钟后，核聚变反应就停止了，因此在宇宙诞生的初期不可能形成比较重的原子核。太阳和恒星上发生的"质子—质子"核反应和"碳—氮—氧循环"核反应方式仅仅给出部分元素合成的途径，真正解决宇宙中元素合成问题则是后来完成的B^2FH元素形成理论。

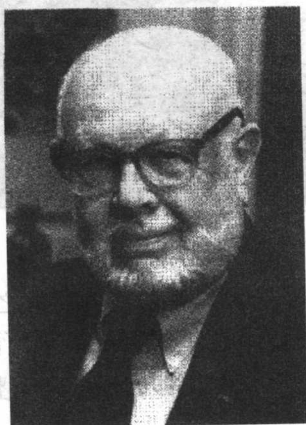

图7-6　美国天文学家福勒


图7-7　英国天文学家霍伊尔

1954年到1955年福勒是在英国剑桥大学度过的。此次赴英是为了和伯比奇夫妇(G. Burbidge, M. Burbidge)及霍伊尔(F. Hoyle)(见图7-7)进行合作。他们以元素丰度曲线为标准，研究恒星中元素形成的理

论，于 1956 年在《现代物理评论》期刊上发表题为“星体元素的合成法”的论文，全面阐述了重元素在恒星内部发生的核反应中生成的理论。按作者姓氏字母顺序是伯比奇、伯比奇、福勒和霍伊尔，因此人们称此论文为 B^2FH 元素形成理论。

福勒虽是这篇论文的第三作者，但他却是核心人物。在论文发表的前几年中，福勒和霍伊尔合作已成功地解决了恒星中碳元素形成的问题。碳元素合成问题的解决成为恒星元素合成理论的关键。以此为例，其它重元素在恒星中合成的问题就很容易解决。如用氦核（α 粒子）轰击碳原子核，每次使核的质量增加 4 个原子质量单位，新形成的核又会衰变为其它元素和同位素。对于比铁更重的元素，单个中子打进原子核的反应也是很重要的，每次可以使核增加一个质量单位。各种元素合成的核反应过程是否能实现取决于它们的反应速率、反应截面和反应所要求的温度和压强条件。这些都是要在实验室中一一地进行实验和测量的。这些实验和计算非常繁杂，工作量很大，但是与解决碳元素合成的难题相比就容易得多了。福勒和他的小组成功地完成了恒星中所有的元素及其同位素生成的将近 100 个核反应过程的反应速率的计算，为 B^2FH 理论的建立作好了充分的准备。福勒和凯洛格实验室的合作者对恒星核合成理论的形成起了关键作用。

B^2FH 的论文受到极高的评价，被视为科学经典论文。可以说，这篇论文解决了在恒星中产生各种天然元素的难题。这一理论提出了恒星不同演化阶段相应的八种核反应合成过程，可以形成所有的元素及其同位素。这些元素合成后，可能由恒星抛射到宇宙空间，形成了我们所观测到的元素的丰度分布。B^2FH 理论提出的八个过程是：四个氢核聚变为氦核的过程；氦核聚变为碳核和氧核等的过程；α 粒子与氖同位素相继反应生成镁、硅、硫、氩等的过程；产生铁峰元素（钒、铬、锰、铁、钴、镍等）的过程；慢中子和快中子俘获过程——以合成比铁峰元素更重的元素；质子俘获过程——以合成一些低丰度的富质子同位素；以及生成氘、锂、铍、硼等低丰度轻元素的 X 过程。

福勒因为对宇宙化学元素形成机制的研究所作出的贡献而荣获

1983 年度的诺贝尔物理学奖。应该指出的是，霍伊尔和伯比奇夫妇对 B^2FH 理论的建立也作出了重要贡献，B^2FH 理论是四个人通力合作的结果。霍伊尔是这一重大研究课题最初的开创者，长期从事这一课题的研究并作出了相当大的贡献，在科学界的很多人看来，他应该和福勒一起获此殊荣，然而却无缘此奖，这不能不说是一件憾事。

2. 超新星爆发和重元素的由来

宇宙最初全部由氢和氦组成。所有较重的元素都是通过恒星内部的核聚变反应而形成的。比铁更重的元素，则是在超新星爆发时极高温度和极高密度的条件下才会形成。而随着超新星爆炸，包括爆炸过程中生成的重元素在内的众多的重元素便抛撒到宇宙空间去了，这些元素又结合成下一代的恒星，可能还有行星。我们地球上现存的所有比铁重的元素，我们人体中的微量重元素都是 50 亿年以前超新星爆发的遗留物。除了宇宙大爆炸后形成的第一批恒星外，其它恒星中也都会有超新星爆发的遗留物。

1987 年在银河系的近邻星系大麦哲伦星云中出现的超新星 1987A 是近四个世纪以来地球上可见的最近和最亮的超新星(见图 7-8)，天文

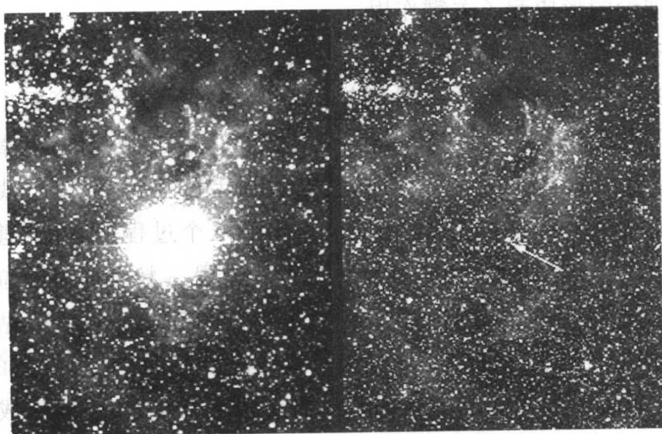


图 7-8　超新星 1987A 爆发前(右边箭头指示)和爆发后(左边大亮斑)

学家获得了一个奇迹般的机会来获得有关超新星形成新元素过程的更多的知识。在超新星爆发期间,迅速发生的核反应形成一系列罕见而短暂的放射性核,以及其它一些更稳定的重元素。放射性元素在衰变时发出的强烈的 γ 射线可能被超新星产生的膨胀气体云所吸收、散射和再散射。这些 γ 射线最终可能变成可见光。

只有半衰期比较短的放射性同位素才能在比较短的期间被观测到。钴 56 的半衰期为 77 日,钴 57 的半衰期为 270 日。它们都在超新星 1987A 中观测到了。从 1987 年到 1991 年,来自这个超新星的可见光正好是以这样的速率衰减的(见图 7-9)。在超新星爆发过程中产生的其它放射性元素要比钴 56 和钴 57 的寿命长得多。例如,具有中等丰度的放射性同位素铝 26 的半衰期为 716 000 年,当然就很难提供观测证据了。

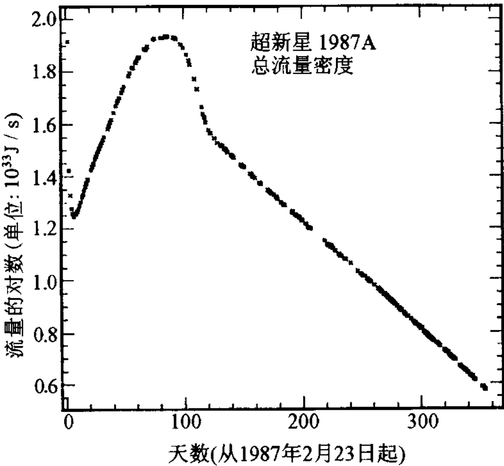


图 7-9　超新星 1987A 的光变曲线

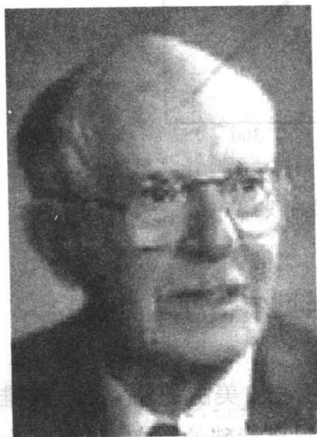
五、中微子天文学和 2002 年诺贝尔物理学奖

太阳上的热核反应过程产生了大量的中微子,美国的雷蒙德·戴维斯(R. Davis, Jr.)和日本的小柴昌俊首先研制出特殊的设备,观测到太

阳中微子,并发现了"太阳中微子短缺之谜"。虽然,揭开这个"谜"的并不是他们,但开创中微子天文学的功绩使他们于2002年共同荣获诺贝尔物理学奖。

1. 中微子的提出和发现

中微子是在1930年由美国物理学家泡利(W. Pauli)在研究β衰变的过程中提出来的。β衰变说的是一个孤立的(或处于原子核中的)中子衰变为一个质子和一个电子的过程。对比β衰变反应的前后能量的变化后发现,反应后能量变小了。这明显地违反了能量守恒的规律,也曾使物理学家怀疑能量是否守恒。泡利坚持能量守恒定律,他假定这些能量是被一个取名为中微子的新粒子带走了。因为β衰变后电荷量没有变,质量也没有发现减少,所以中微子不带电,质量几乎为零。现在认为中微子可能有很小的质量,大约只有电子质量的几百分之一。中微子没有电磁相互作用,也没有核子(质子和中子)间的强相互作用,所以太阳介质对中微子几乎是透明的,中微子可以毫无阻碍地从太阳内部一直传到地球内部。由于中微子几乎不与任何物质发生作用,因此极难探测,它们深深地"隐身"在宇宙中。


图 7-10 美国天文学家戴维斯

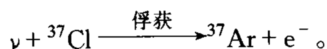
要探测一个中微子,只有当这个中微子与探测器中的物质发生碰撞,产生信号才能被探知。早在1942年,我国物理学家王淦昌提出一个间接的方法来检测中微子。其原理是,铍($^{9}_{4}$Be)的同位素核 $^{7}_{4}$Be 俘获一个K层(最内层)电子,原子核中的一个质子变为中子而变成锂 $^{7}_{3}$Li,这时放出一个中微子。只要测定 $^{7}_{3}$Li 的反冲动量或能量,就可以推知中微子的性质。1952年戴维斯(见图7-10)用这种方法得到单能反冲核,间接地证明了中微子的存在。

直接发现中微子则是在 25 年以后由柯温(C. L. Cowan)和莱茵斯(F. Reines)在 1955 年完成的。他们把 200 升的水和 370 加仑[①] 的液体闪烁体做探测器埋在很深的地下，在附近放置一个能放射极强中微子束的核反应堆。经过很长的时间，才成功地直接测量到为数不多的反中微子。随着时间的推移，中微子在现代粒子物理学和现代天文学研究中越来越显示出它的重要性。1995 年诺贝尔物理学奖授予中微子的发现者之一莱茵斯，可惜柯温死得太早，未能获此殊荣。

2. 太阳中微子的探测

太阳的能量来自四个氢原子核合成一个氦原子核的聚变反应。每形成一个氦原子核就会释放出 2 个中微子。太阳每秒钟要消耗 5.6 亿顿氢，释放 1.4×10^{38}个中微子，也就是释放“1 百多万亿亿亿亿”个中微子。大量的中微子从太阳内部产生以后就浩浩荡荡、畅行无阻地射向四面八方。地球表面每平方厘米的面积上，每秒钟就要遭受到几百亿个太阳中微子的轰击。长期以来，人们只能根据观测太阳表层来推测太阳内部的状况。可中微子却是直接从太阳内部跑出来的，它们给人们带来了有关太阳内部状况的宝贵信息。

中微子的穿透能力极强，极难探测。上百亿个中微子穿过即使像地球那么大的探测器，要探测到其中的一个也很不容易。因此，当时的物理学家都认为，不可能探测到太阳中微子。美国布鲁克海文实验室的物理学家戴维斯是 20 世纪 50 年代惟一敢于探测太阳中微子的科学家。中微子探测器的原理是使中微子与某些元素的原子核发生核反应，从这个反应的生成物来判断探测到多少个中微子。戴维斯领导研制了一种中微子氯探测器，是利用中微子(用 ν 表示)与氯原子的反应，反应式为



$$\nu + {}^{37}\mathrm{Cl} \xrightarrow{\text{俘获}} {}^{37}\mathrm{Ar} + e^{-}。$$

这个反应过程的放射性同位素氩^{37}Ar 的半衰期为 35 天，氯和氩的

① 加仑，英制体积单位，1 英加仑(UKgal) = 4.546 092 升，1 美加仑(USgal) = 3.785 43 升。

原子核中核子数相同,氯核由于其中的一个质子变为中子而变为氩的同位素。用化学提纯的方法把生成物氩提取出来,从而可得知有多少中微子参加反应。戴维斯之所以用氯原子作俘获剂,是因为这样的探测材料很便宜。他研制的探测器是一个特制的大钢罐子,里面装着615吨四氯乙烯液体。为了避免宇宙射线在大气中产生的氩的影响,探测器放置在南达科达州地下深1500米的一个旧金矿里。当中微子穿过这个大罐子时,就可能偶尔与罐中的四氯乙烯溶液发生反应,生成氩的放射性同位素($^{37}_{18}Ar$),并放出电子。在经历30年漫长岁月的探测中,他共发现了来自太阳的约2000个中微子,平均每个月才探测到几个中微子。要从615吨液体中提取如此少的氩原子,真好比在大海里捞针,困难得很。

然而,他们所探测到的中微子数目比理论预期的要少很多,仅为理论值的1/3,另外2/3的太阳中微子不见了。这就成为著名的太阳中微子失踪之谜。当然,人们首先要问的第一个问题是,实验是否可靠?这迫使他们认真考虑捕捉中微子的实验装置的局限性。任何探测器都有一个极限灵敏度,只能探测到超过某一能量的中微子。恰好,中微子氯探测器的灵敏度较低。太阳中微子的能量是连续分布的,低能量的中微子占大多数。戴维斯的探测器只能探测太阳中微子中的很小一部分高能中微子。为了探测具有中低能量的太阳中微子,欧美合作、美苏合作分别研制了耗资巨大的新型的镓中微子探测器,简称GALLEX和GNO。到2000年为止,这两台探测器的观测结果很接近,测量到的中微子数约为理论预期值的60%,仍然没有解决“太阳中微子失踪之谜”。

3. 小柴昌俊的中微子水切连科夫探测器及其探测

中微子与水中的氢和氧原子核发生反应有可能产生一个电子,这个电子的速度非常快,在水中可引起一种称之为切连科夫辐射的微弱闪光,探测这种微弱的闪光就可证实中微子的存在。日本的小柴昌俊(见图7-11)等按照这个原理研制了新型中微子探测器。为了避免干扰,探测器放在神冈的一个很深的矿井中。探测器就是一个很大的水池,为了探测中微子在水池中发生碰撞产生的高能电子所发出的切连科夫光子,

在水池中放置许许多多的光电倍增管。到了90年代,小柴昌俊等人又研制了一台超神冈中微子探测器,规模更大,探测能力更强,新探测器用了50 000吨水和10 000多个光电倍增管。小柴昌俊等研制的中微子探测器还有一个优点就是可以辨别中微子的入射方向,并且能及时地记录下来,而戴维斯研制的探测器则没有这些功能。神冈和超神冈探测器分别于1993年和1996年开始正式探测,都探测到中微子,并确认是来自太阳的中微子,而且中微子的能谱与太阳模型所预言的能谱符合得很好。中微子数的测量值约为理论预测值的一半,短缺现象依然存在。这无疑是对戴维斯的实验结果的有力支持,也排除了太阳中微子短缺是由于实验本身不完善所造成的猜测。



图7-11　日本天文学家小柴昌俊

1987年发生在大麦哲伦星云中的超新星给中微子天文学以巨大的刺激。人们公认,在超新星爆发过程中产生数量惊人的中微子,其中约有"一亿亿"个中微子通过神冈中微子探测器,在这些中微子中他们成功地探测到12个。

4. 解开太阳中微子丢失之谜

由三种不同类型的探测器所得到的太阳中微子数虽然不同,但都大大低于理论预测值。这促使天文学家回过头来考虑:现有的太阳"标准模型"是否正确?物理学家则再一次考察:中微子理论的"标准模型"是否正确?

太阳是离我们最近的恒星,虽然我们对它的观测能比其它恒星更仔细,但仍然只能看到太阳的大气层,而不能深入到太阳内部。只能从理论上讨论太阳内部,特别是中心区的物理状况和结构。物理学家给出种种可能的产生能量的热核反应的理论,如前面介绍的"质子—质子"反应和"碳—氮—氧循环"反应,建立起的太阳内部的热核反应模型,并与我

们观测到的太阳辐射情况相适应。由此可知太阳"标准模型"是很理想的。但是,太阳中微子的测量结果却对太阳"标准模型"提出了疑问。于是,各种修正的太阳模型纷纷提出,但却没有新的理论模型能站住脚。太阳"标准模型"仍然是正确的,进一步的考察发现理论至多只会有百分之十几的误差,不可能导致观测到的那么大量的中微子短缺。

那么,中微子物理本身存在的问题就可能是太阳中微子短缺的真正原因了。按照粒子物理的标准模型,中微子的质量为零。但是关于中微子是否有质量的问题一直是物理学家争论的问题。中微子即使有质量,也是非常之小,测量起来非常困难,很难有定论。但是,如果中微子的质量不为零,这世界就大大地变了样。

有三种中微子,一种是电子型中微子(ν_e),另外还有 μ 中微子(ν_μ)和 τ 中微子(ν_τ),分别与 μ 轻子和 τ 轻子密切相关。μ 轻子和 τ 轻子也是基本粒子,由于它们没有强相互作用而称轻子。这三种中微子之间彼此不相关。但是,如果中微子具有质量,这三种中微子之间就可以彼此来回转化,也就是存在中微子振荡现象。中微子有没有质量一直是个疑团,只能依靠实验室来解决。但是实验结果是否可信,争论很大,直到 1994 年美国科学家洛斯·阿拉莫斯的实验测定中微子的能量在 0.5～5 电子伏之间,证明中微子具有非常微小的质量,才有比较公认的看法。

太阳内部核反应产生的都是电子型中微子,在它们从太阳内部到地球的行程中,电子型中微子可能转化为其它两种,平均来说,这 3 种中微子各占 1/3 是很合理的。这样,物理学家用中微子振荡的假说很自然地解释了探测到的太阳中微子短缺。

理论假说需要用实验来证明。2002 年奇迹出现了,一项庞大的国际合作以实际探测结果证明了这个假说。由国际上 17 个研究单位,179 位科学家组成的课题组,利用在加拿大赛德伯勒中微子天文台(SNO)的巨型地下重水探测器进行太阳中微子的探测。SNO 的探测器是一个能装 1000 吨重水的球形容器,容器四周安装了 1 万个光检测器(图 7-12)。重水与一般的水不同,它是由氢的同位素氘与氧元素结合而成的分子。氢原子核只有一个质子,而氘原子核有一个质子和一个中子。这个研究组

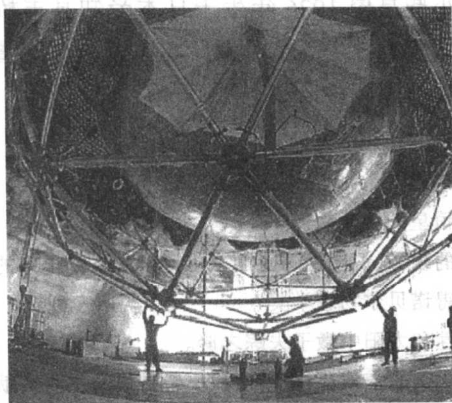


图 7-12　赛德伯勒中微子天文台直径 12 米容器的底部

成功地观测到了来自太阳方向的两种中微子 ν_μ 和 ν_τ，而且 ν_μ 和 ν_τ 的总量差不多正好是 ν_e 的两倍，正好补上了太阳中微子短缺的 ν_e。历时将近半个世纪的太阳中微子短缺案终于告破。

5. 太阳中微子与 2002 年诺贝尔物理学奖

中微子是一种非常重要的基本粒子，围绕中微子的研究已经在 1935 年和 1995 年两次荣获诺贝尔物理学奖。2002 年戴维斯和小柴昌俊又因中微子的研究而获奖，不过这次却是因为他们打开了中微子天文学的大门。由于他们两人的发现，科学研究领域出现了一个新的学科——中微子天文学。

瑞典皇家科学院发表的新闻公报说，1935 年诺贝尔物理学奖获得者、著名物理学家沃尔夫·冈·泡利，早在上世纪 30 年代便预测了神秘的中微子的存在。在太阳和其它恒星内部发生核聚变时产生的中微子几乎不与其它物质发生作用，因此尽管每秒钟有数万亿个中微子穿过我们的身体，我们仍然很难发现它们的踪迹。最终能够捕获到中微子应当归功于美国的雷蒙德·戴维斯和日本的小柴昌俊。

美国科学家雷蒙德·戴维斯 1914 年生于华盛顿，1942 年获美国耶鲁大学化学博士学位，现为美国宾夕法尼亚大学物理学和天文学系名誉教

授。日本科学家小柴昌俊1926年生于日本爱知县丰桥市，1955年获美国纽约罗切斯特大学博士学位，现为日本东京大学名誉教授，任职于东京大学基本粒子物理国际中心。

思考和复习题：

1. 简要说明太阳和恒星的能量来源。
2. 简述宇宙中元素的来源，说明地球上的众多元素是从哪里来的？
3. 福勒为什么能获得诺贝尔物理学奖？
4. 简述中微子的特性和太阳中微子失踪之谜。
5. 荣获诺贝尔物理学奖的雷蒙德·戴维斯和小柴昌俊的主要贡献是什么？

第八讲

射电天文望远镜的发展

射电天文学是20世纪40年代第二次世界大战后迅速发展起来的天文学中的一个新的分支。与光学望远镜约400年的历史相比，射电望远镜仅有几十年，但是射电天文很快就步入了鼎盛时期。20世纪60年代射电天文学的“四大发现”，即脉冲星、星际分子、微波背景辐射和类星体的发现成为20世纪中最为耀眼的天文学成就。射电天文学已成为重大天文发现的发祥地和以其成果使天文学家荣获诺贝尔奖的摇篮。射电望远镜由于它所观测的波长远比可见光长，导致口径相同的情况下分辨率差5、6个数量级。英国天文学家赖尔(M. Ryle)发明的综合孔径射电望远镜，在分辨率、灵敏度和成像技术等方面都可以与光学望远镜相媲美。赖尔的发明促使射电天文观测技术飞速地发展，他也由此荣获1974年诺贝尔物理学奖。射电天文甚长基线干涉观测的发展又把射电天文观测技术推上新的高峰，使射电望远镜的分辨率远远超过光学望远镜。

一、射电天文望远镜和射电天文学的萌生

宇宙天体的辐射是全波段的，但是，地球大气只有两个窗口，分别允

许可见光和无线电两个波段的辐射通行无阻地到达地面。来自天体的辐射还有红外、紫外、X 射线和 γ 射线，这些波段的辐射均被大气层所阻隔。必须把红外、紫外、X 射线和 γ 射线探测设备放入太空轨道才能发挥功用。

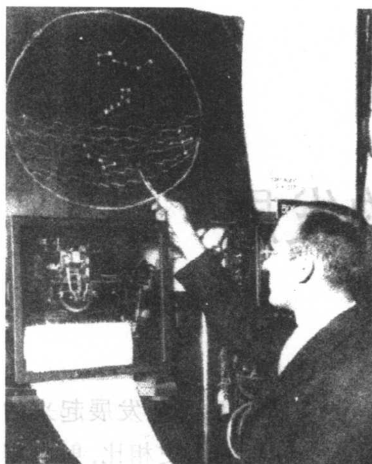


图 8-1 发现天体射电辐射的央斯基

自有人类以来人们就通过光学窗口看到了满天星斗，无线电波段的射电窗口虽然也一直敞开着，但人们并不知道有这个窗口，也不知道天体也辐射无线电波段的电磁波。20 世纪 20 年代美国贝尔电话实验室的央斯基(K. G. Jansky)(见图 8-1)发现了从这个射电窗口跑进来的宇宙天体发出的无线电信号。经过 3 年的努力，他终于弄清楚造成无线电通讯中的众多干扰噪声中有一个是来自银河系中心的无线电辐射。天文学家常把无线电波段称为射电波段。1932 年央斯基在《无线电工程师协会会报》上发表了这一结果，标志着射电天文学的诞生。

央斯基的发现并未引起天文界的轰动，也没有什么天文学家紧跟着去发展射电天文的观测和研究。因为光学望远镜和射电望远镜是两种完全不同的技术要求，那时的天文学家都不熟悉甚至不懂无线电技术，加之央斯基使用的射电天线的分辨率极差，不可能用来观测天体的射电辐射。惟一感兴趣的人还是央斯基的同行美国无线电工程师格罗特·雷伯(G. Reber)。他设计制造了第一架射电望远镜，天线为直径 9.45 米的金属抛物面，工作波长在 1.84 米。后来他又改进使之适用于 60 厘米波长的观测。这比央斯基的工作波长为 14.6 米的天线阵要好得多。即使到了 21 世纪的今天，类似大小的天线和工作波长的射电望远镜还在有效地观测太阳射电辐射。雷伯进行了十年的天文观测，描绘出银河系射电源的分布，虽然非常粗略，但它却是人类第一张天体射电源的分布图。

1940 年他在天文学杂志《天体物理学》上发表这一结果，引起了天文学家的重视。

但是，天文学家还没有来得及仔细品尝这道美餐的味道，第二次世界大战的爆发中断了射电天文学的发展。可是，由于战争的需要，飞速发展的雷达技术为战后射电天文的发展准备了绝好的条件。英国的海伊(J. S. Hey)对一起曾使英国军用雷达受到干扰的重大事件进行分析后发现，太阳上发生的射电爆发是这一事件的罪魁祸首。雷达对无线电信号非常灵敏，因此有很多机会接收到来自天体的射电辐射。不仅接收到央斯基 30 年代所发现的银河系中心的射电辐射，还接收到太阳射电爆发以及流星遗迹的雷达回波。后来发展起来的接收天体射电辐射的望远镜和雷达接收系统几乎是一样的。战后，一些雷达科技人员转向天文学研究，把雷达技术用于射电望远镜的研制，开始天文观测研究。英国的赖尔就是其中最杰出的代表。

射电望远镜这种新的观测手段一出现，就显示出极大的优越性。射电望远镜可以不分白天、黑夜，也不管是晴空万里还是阴云密布，都可以进行观测，是一种“全天候”望远镜。射电波可以穿过光波透不过的尘雾，可以观测光学望远镜所不能观测研究的天区。有的天体在所有电磁波段上都有辐射，成为全波段天体。有的天体则只在射电波段的辐射很强，只能用射电望远镜才能看到它们，研究它们。

当然，射电望远镜也有它的弱点。它不像光学望远镜那样可以把可见光全部接收，加上不同的滤光片再分出单色光。射电望远镜只能工作在一个波长，天生就是一个单色仪。要想观测多个波长，虽然可以用同一个抛物面天线，但却要求有多个馈源和接收机。就初期的射电望远镜来说，很多性能远不如光学望远镜。光学望远镜轻而易举地获得很高的分辨率，而射电望远镜则不然。还有一个重要的差别就是光学望远镜本能地就可以拍摄出多姿多彩的天体照片，而射电望远镜则只能给出枯燥无味的表示强弱的曲线。

二、射电望远镜原理和面临的挑战

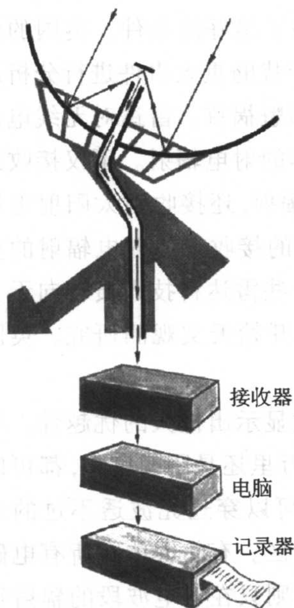


图 8-2　射电望远镜的工作原理

射电望远镜与光学望远镜大不相同,它既没有长长的镜筒,也没有大大的物镜和较小的目镜。它有的是一面类似于雷达那样的天线和一台类似于收音机那样的无线电接收机,再加上一台用于记录的计算机。巨大的天线是射电望远镜最显著的标志和最重要的部件。

无线电波段与可见光、红外线、紫外线以及 X 射线、γ 射线一样都属于电磁波。不管什么波段,天文观测都有一个共同的要求,首先要求有很高的灵敏度,能接收到来自天体的微弱辐射。还要有很强的空间分辨率和时间分辨率,不仅能看清天体的细节,还要记录下快速的变化。最初的射电望远镜是由雷达改造的。事实上,雷达先发出无线电波,然后又接收由被探测对象反射回来的电波,它的接收工作就相当于一台射电望远镜。简单地说,如图 8-2 所示,射电望远镜是由天线、接收器(放大器)、数据采集器和记录器组成。现代射电望远镜的数据采集器和记录器都由计算机担当。

灵敏度是望远镜最重要的参数之一。一个物体只要足够明亮,无论距离多远,我们都可以看到。对光学望远镜来说,灵敏度是指望远镜能观测到多少视星等的星,而对射电望远镜来说,则是指其能观测最小的流量密度。射电天文灵敏度公式是

$$S_{\min} = \frac{2KT_{\text{sys}}}{A\sqrt{\tau \cdot \Delta f}},$$

其中 S_{min}是最小可测流量密度，单位是 $W/(m^2 \cdot Hz)$，A 为天线面积，Δf 是频宽，τ 是观测时间，T_{sys}是接收系统噪声系统温度，$K=1.38\times10^{-23}$ J/K 为玻尔兹曼常数。流量密度单位是央斯基(Jy)，1 Jy = 10^{-33} J/(s·Hz·m²)。目前能观测到的弱射电源的流量密度约为 10^{-4}央斯基。由于最小可测流量密度与天线面积成反比，因此研制大型天线射电望远镜成为提高灵敏度的一个重要方法。此外，增加频带宽度和时间常数都是提高灵敏度的有效方法。同时，降低接收系统噪声系统温度对观测效果常常起到关键的作用。现代的接收机都是采用低噪声放大器，常常把接收机放大器的前端放置在天线上信号的输入处，以减少传输中的损耗，用液态氦浸泡前置放大器以保持 -260℃ 左右的低温，这样一来，接收机本身的噪声就非常小了。

抛物面天线在射电望远镜中最常用，它的一个功能是收集能量，天线的面积越大，收集到天体的能量越多。抛物面天线的第二个功能是它的方向性，来自与抛物面主轴平行方向上的天体射电波经抛物面反射后会聚到焦点，放置在焦点处的"馈源"收集射电波，并把它们传输到接收系统。如图 8-3，对于与主轴平行的电波，经反射后会聚到焦点 F，每道光的路程都相等，即 $ABF=CDF=EGF=HKF$。在焦点处，电波相位相同，抛物面反射到 F 点的信号相加。但是，如果射电波偏离主轴方向较多，就不会会聚到焦点处的"馈源"上，因此这类射电望远镜只能接收到来自主轴方向附近一个角度的电磁波，这个角称为分辨角。分辨角越小，则分辨率越高。分辨角的公式为：

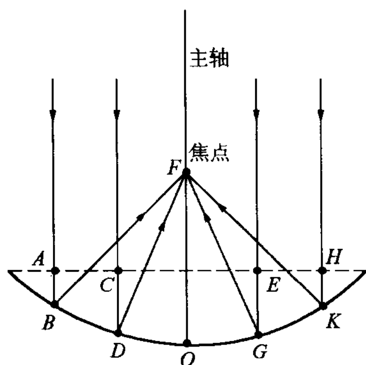


图 8-3 抛物面天线聚集天体辐射的原理

$$\theta(\text{弧度}) = 1.22\,\frac{\lambda}{D}。$$

光学天文望远镜和射电天文望远镜的分辨角(θ)公式都是一样的。

分辨角和波长(λ)成正比,和望远镜的口径(D)成反比。分辨角越小,表明能分辨清楚天体细节的能力越大,也就是分辨率越高。因此分辨率与观测波长成反比,与望远镜口径成正比。光学波段的波长远比射电波段的短,光学望远镜的分辨率远比射电望远镜高。

三、世界上的大型单天线射电望远镜

为了提高望远镜的灵敏度和分辨率,以便能够接收到天体更微弱的射电信号,天文学家们迫切希望建造大型射电望远镜。20 世纪 50 年代,英国一马当先,美、澳、前西德也奋起直追。射电天文学呈现了飞速发展的局面。

建造大型可跟踪射电望远镜面临巨大的技术困难。所谓大型是指抛物面的直径超过 64 米,可跟踪是指天线运转自如,能准确地指向天空中各个方向或跟踪一个射电源,这在技术上就非常困难。更困难的是要求天线的加工精度非常高,天线表面形状与理想的抛物面最多只能相差 1/20 波长,对厘米波的观测则要求加工精度达到毫米级。如果偏离抛物面形状,天体信号就不能会聚到焦点。即使加工精度达到了要求,大型天线表面形状可能因天线的自重引起变化,也可能因风力的大小和温度的变化导致变形,这个困难更难解决。

英国曼彻斯特大学在 1950 年提出建造一台口径为 76 米的可跟踪射电望远镜雄心勃勃的计划,是冒着相当大的风险的。经过 7 年的艰苦奋斗,于 1957 年完成,1958 年投入观测,成为当时世界上最大的射电望远镜(图 8-4)。这台放置在焦德尔班克的射电望远镜后来被称为洛弗尔射电望远镜。

澳大利亚紧跟英国之后,于 1958 年动工建造口径为 64 米的大型射电望远镜,仅用两年半的时间就完成了,于 1961 年开始投入观测,取名为帕克斯(Parkes)射电望远镜(图 8-5)。这架射电望远镜直到今天还是南半球最大的可跟踪射电望远镜,管了半边天。地缘优势变为胜势,帕克斯射电望远镜的口径不及北半球的几台射电望远镜,但它取得的观测

成果却可以与之匹敌。

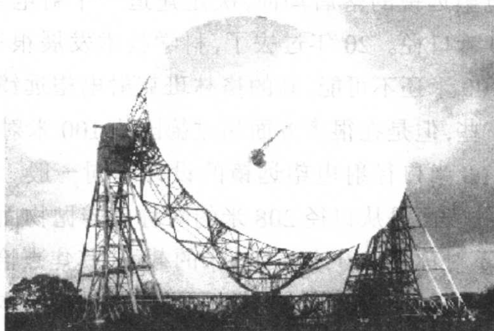


图 8-4　英国 76 米口径射电望远镜

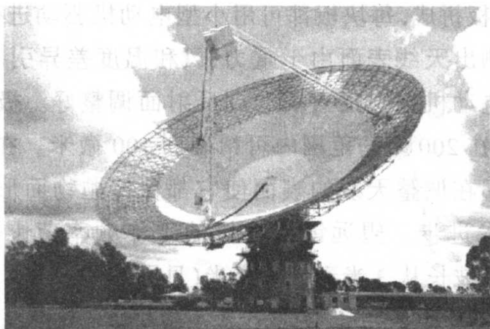


图 8-5　澳大利亚 64 米口径射电望远镜

到了 1972 年，德国研制口径为 100 米的特大型可跟踪射电望远镜获得成功，使射电望远镜技术大大地向前发展了一步。这台放置在德国波恩市西南大约 40 千米的埃费尔斯贝格的一个山谷中的射电望远镜，采用主动反射面技术，克服了天线自重、风力和温度等引起天线表面形状变化的影响，在 1972 年 8 月 1 日启用时可接收从 36 厘米到 80 厘米的天体射电波，不久以后达到了能观测 3.5 毫米这样短波长的射电辐射。成为世界上口径最大的可跟踪射电望远镜，直到今天也只有美国格林班克射电望远镜比它稍大一些。

美国国家射电天文台格林班克 91 米口径射电望远镜于 1988 年 11

月15日在使用过程中突然倒塌。美国天文学家借此机会要改变美国可跟踪单天线射电望远镜的落后局面，决定建造一个射电望远镜，超越德国已达到的100米口径。20年过去了，科学技术发展很快，不过要在口径上大大超过100米还不可能，新的格林班克射电望远镜在口径上仅仅比100米稍大一些，但是在很多方面超过德国的100米射电望远镜。

格林班克100米口径射电望远镜的设计非同一般。天线采用独特的偏轴方式，天线表面是从口径208米的对称旋转抛物面中截下的一部分，是一个表面不对称的110米×100米的截面，其焦点恰好在天线的一个边缘的上方。这样在天线表面的正上方空无一物，天体的辐射可以直接到达天线表面，增加了有效面积，并且消除一般射电望远镜支架所引起的反射和衍射。望远镜采用自动化非常高的主动反射面系统。天线由2004块金属板拼成，每块板都可用小型电动机驱动进行调整，极光测距系统及时地测出天线表面由于重力、风和温度差异引起的形变，然后发出指令通过电动机把主反射面和副反射面调整好。极光测距仪的测量精度非常高，在200米的范围内可精确到100微米。在望远镜运转过程中随时随地都在调整天线的表面使它都保持抛物面形状。这是一个了不起的的技术进步。望远镜接收机的工作频率范围从100 MHz到115 GHz，也就是波长从3米到2.6毫米(见图8-6)。

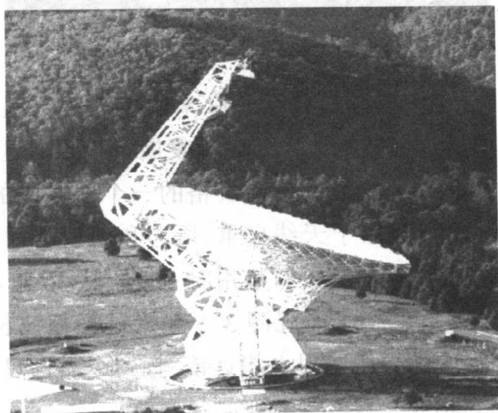


图8-6　美国格林班克100米口径射电望远镜

扩大天线面积的另一个办法是建造固定在地面上的天线系统。在波多黎各的阿雷西博，有一个直径达305米的球面天线仰面朝天静静地躺在一个巨大的山谷中。这就是由美国康奈尔大学于1963年建造的，迄今为止全世界最大的射电望远镜，它的天线是借这个碗形山谷的自然地形固定在那里的(见图8-7)。它可以接收从6厘米到50厘米的波长。在组成球面天线的金属板下还有行驶小车的通道，以便于对天线的维修和保养。这面巨大天线的总接收面积达80 000平方米，能够接收到远在100亿光年之外的天体的射电波。原来的天线是金属网的，只能工作在50厘米波段，1972～1974年改建为铝板，使工作波段达到5厘米。1980年以后，又进行了一次改建，把天线直径扩大到366米。



图8-7　美国阿雷西博305米口径射电望远镜

阿雷西博射电望远镜的天线反射面不能动，依靠吊在上空的接收器的移动来扩大它的视场，使它能观测20°的天区范围。由于天线表面是球面，来自天体的射电波不能像抛物面那样聚焦到一个点上，而要采取比较复杂的改正镜或线性馈源的方法来收集能量。

四、我国的射电天文望远镜

我国射电天文学始于1958年。当时为了与苏联射电天文学家合作在海南岛观测日环食，在中科院副院长吴有训的主持下，成立了射电天

文组。这之后,才开始筹划我国射电天文学的发展和人才培养。

在很长的一段时间里,小型太阳射电望远镜得到比较广泛和持续的发展。图 8-8 是国家天文台北京怀柔的三台太阳射电望远镜组成的宽带动态频谱仪(其频率范围从上到下分别为:1.10—2.06 GHz;2.6—3.8 GHz 和 5.2—7.6 GHz),主要观测研究太阳射电爆发频谱随时间的变化。由于其频率覆盖范围特别宽,时间分辨率特别高,已发现许多太阳射电爆发的新现象。

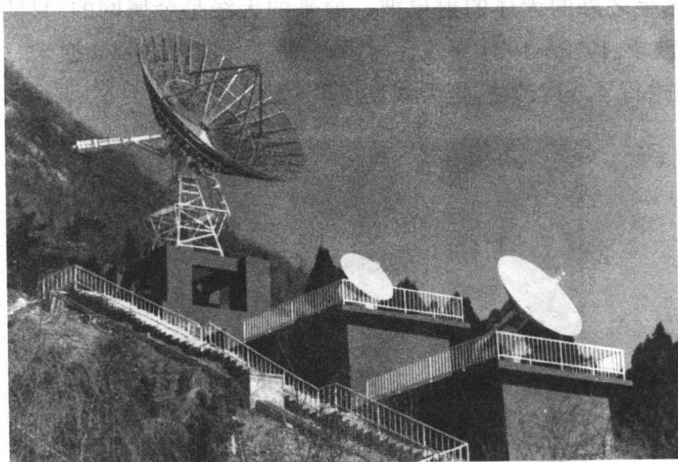


图 8-8 国家天文台北京怀柔站的三台太阳射电望远镜组成的动态频谱仪

1984 年,我国密云米波段综合口径射电望远镜建成,开始了观测研究宇宙射电(见图 8-19)。1990 年,青海德令哈 13.7 米口径毫米波射电望远镜建成,其面板精度达到 0.1 毫米,整个望远镜安装在对射电波高度透明的天线罩内(图 8-9)。它用于观测宇宙分子谱线,由于成功地研制了多个波段的毫米波超导接收机,灵敏度很高。

1987 年和 1993 年分别投入使用的上海和乌鲁木齐的两台 25 米口径射电望远镜是专门为甚长基线干涉观测研制的,目前已成为国际联网观测的重要成员(见图 8-22)。目前,乌鲁木齐 25 米射电望远镜还进行脉冲星、分子谱线和 6 厘米波段的偏振巡天观测研究。

作为中国科学院重点支持的创新项目“500 米口径射电望远镜预研”

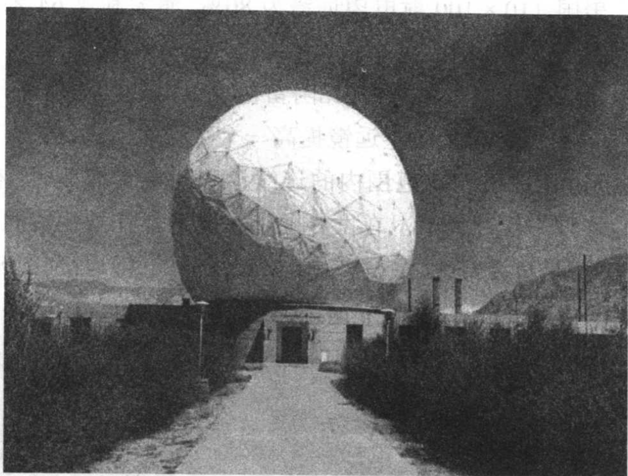


图 8-9　紫金山天文台青海德令哈 13.7 米口径毫米波射电望远镜，安装在这个特制的蒙皮罩里面

正在有步骤地进行。这个望远镜简称 FAST，计划建在贵州山区中的一个开口 500 多米的碗状山谷中，依托地形建造口径为 500 米的球面反射面固定天线。天线反射面不能动的最大好处是建造技术难度不大，也没有因天线转动指向不同方向时因自重而引起反射面变形的困惑。因此固定在地面上的天线可以做得很大。但是，天线很大，又不能动，必将使望远镜只能观测很小的天区。阿雷西博射电望远镜采用球面天线的原因是球面天线没有主光轴，可以接收来自较大角度范围的天体射电波，借助馈源的移动来扩大可观测天区范围。但是馈源的方式不得不设计得非常复杂。尽管如此，阿雷西博射电望远镜可观测的天区范围还是太小。

对此，FAST 有很大的改进，500 米口径球面天线在观测时只使用口径 300 米的部分天线，采取索网主动反射面技术把这部分天线的表面变为抛物面，相当于有一系列的不同指向的 300 米口径抛物面天线，不仅扩大了能观测的天区范围，还使馈源放置方式就简单得多。FAST 的天区覆盖达到了 70%，阿雷西博射电望远镜仅有 33%。FAST 与可跟踪的大型射电望远镜相比也少不了多少，如德国 100 米射电望远镜的天区覆

盖为75%，美国110×100射电望远镜为80%，澳大利亚64米射电望远镜为90%。

FAST最大的优势是灵敏度，比阿雷西博射电望远镜提高一倍，比口径为100米的全可动单天线望远镜提高一个数量级。FAST有宽的频率覆盖，可进行0.13—5 GHz范围内的连续谱和射电谱线观测，在0.13—1.4 GHz允许频率连续调节。在世界上正在建造及计划建造的射电望远镜中，FAST将是口径最大、最具威力的单天线射电望远镜(图8-10)。

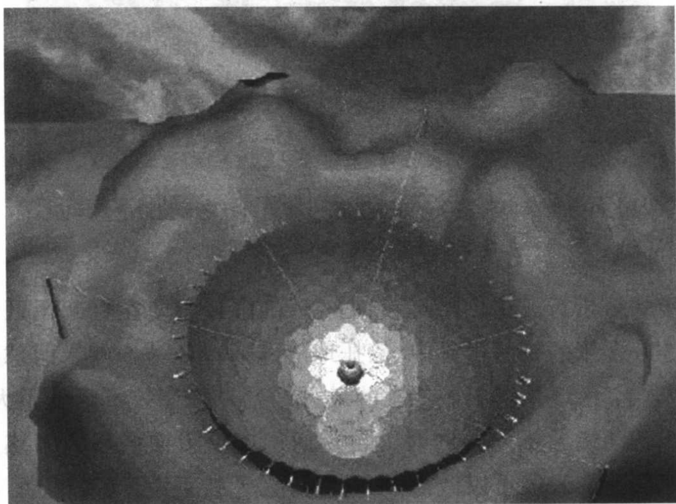


图8-10 国家天文台的500米口径射电望远镜(FAST)的设计图

五、综合孔径射电望远镜

射电望远镜的单天线越做越大，但其分辨率还是远远比不上天文爱好者用的光学望远镜，而且成像能力极差。双天线射电干涉仪大大提高了分辨率，但是这仅仅是一维的分辨率，也不能像光学望远镜那样给出天体的视觉图像，仍然使射电天文学家感到遗憾。为了使射电天文观测在分辨率和成像能力两个方面赶上和超过光学望远镜，射电天文学家进行了不懈的努力，英国天文学家赖尔发明的综合孔径射电望远镜是逐

步实现了这个目标的标志性事件，他为此荣获 1974 年诺贝尔物理学奖。

1. 双天线射电干涉仪原理

为了提高射电望远镜的分辨率，赖尔开始研制射电干涉仪。应用物理学中的光学干涉原理，把相距一定距离(D)的两面天线放置在东西方向的基线上，用长度相等的传输线把各自收到的信号送到接收机进行相加。一般情况下，来自“射电点源”的单频信号不能同时到达两面天线，要相差一段路程。如图 8-11 所示，射电波到达 B 天线比到达 A 天线要多走一段路径 BC($\overline{BC}=D\sin\theta$，$\theta$ 是入射射电波与垂线方向的夹角)。若这段路程差正好是半波长的偶数倍，两面天线接收到的信号相加是同相相加，信号增强。若路程差是半波长的奇数倍，信号相互抵消达到极小。天体的周日运动使 θ 不断变化，也就导致达到两面天线的路程差在不断地变化，接收机的输出呈现强弱相间的周期性变化，形成干涉图形，如图

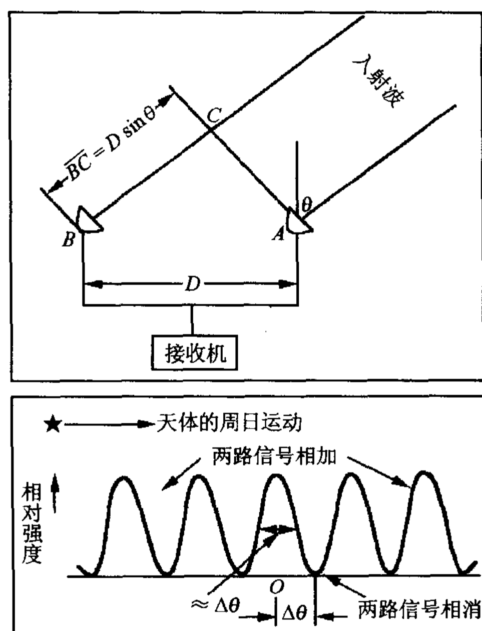


图 8-11　双天线干涉仪的工作原理

8-11 的下半部。用干涉图形的一个方向瓣对准天体，一当天体偏离方向瓣，接收到的辐射就大大地减弱。这个方向瓣的角宽度就是干涉仪的分辨角。分辨角的公式与单天线的公式一样是 $\theta = 1.22\lambda/D$，只不过这里的 D 已不是单个天线的直径，而是两面天线之间的距离了。很显然，基线可以比单天线的直径长得多，因此干涉仪的分辨角可以比单天线的分辨角小很多。干涉仪的分辨率相当于一台直径为基线长度的单天线射电望远镜，基线长度达到 5 千米并不太难，可是要建造一台直径 5 千米的单天线射电望远镜却是天文学家不敢想像的事。射电干涉仪的发明是射电望远镜技术的一次突破性的进展，为射电望远镜的发展开辟了新的途径。

2. 综合孔径射电望远镜原理

单天线射电望远镜给出铅笔束状的方向图，如果束宽比射电源小很多，可以用逐点观测的方法把这个射电源的强度分布画出来。但是，一般的单天线的分辨角比较大，只能给出范围很大的粗略的射电强度分布图。



图 8-12 发明综合孔径射电望远镜的英国天文学家赖尔

1948 年以后，赖尔把观测研究目标从太阳转向太阳系外广阔的空间，发现了一批射电源。他在应用干涉仪观测太阳等课题上积累了丰富的实践经验，也发现了双天线干涉仪的缺陷或不足。以赖尔(图 8-12)为首的射电天文学家，提出用"孔径综合"技术来解决射电天文望远镜的高分辨率、高灵敏度和成像能力等一系列难题。

综合孔径方法至少要有两面天线，也就是双天线干涉仪。不同的是，其中一面固定，以它为中心，画一个圆，等效于一个"大天线"，另一面天线可以移动，逐次放到"等效大天线"的各个位置，每放一个地方

进行一次射电干涉测量；也可以由许多天线来实现，几面固定，几面移动，甚至全部都固定(如图 8-15 下图所示)。不管何种结构，要求测量得到“等效大天线”上所有方向和各种距离间隔上的相关信号，把这些各种间距取向的干涉仪测量资料通过傅里叶变换就可以求得天空射电亮度的二维分布，得到被观测天区的射电天图。综合孔径射电望远镜的优点是不需要制造口径特别大的天线，而用两面或多面小天线进行多次观测达到大天线所具有的分辨率和灵敏度。而且，得到的是被观测天区的一幅图像。

赖尔在 1953 年提出的第一个方案是形状为英文字母 T 形的“综合孔径望远镜”(见图 8-13)。1954 年布莱思(J. Blythe)按照这个思想在剑桥大学建造了第一台综合孔径射电望远镜。它由一整排小单元组成一字形单元和一个可沿着一条垂直线移动 38 个不同位置的小单元组成，可以综合成一个相当于正方形“大天线”的综合孔径望远镜。在波长为 7.9 米上给出 2.2 度的分辨角。这是人类历史上第一台综合孔径射电望远镜，他们用它得到了第一批银河射电辐射的图像。虽然，2.2 度的分辨角不可能获得精细的分布图，但是，这一观测实验证实了综合孔径原理的正确性，意义非凡。从此，射电天文综合孔径时代开始了。几种综合孔径结构原理如图 8-14 所示。

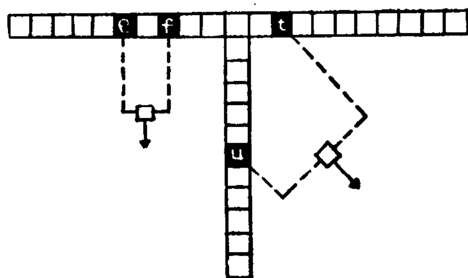


图 8-13　剑桥大学建造的第一台 T 形综合孔径望远镜方案示意图

综合孔径射电望远镜最大的问题是观测和资料处理的工作量太大。“等效大天线”越大，要观测的次数也越多。怎样才能减少观测次数提高综合孔径望远镜的效率呢？赖尔进一步研究，终于弄清楚，地球自转的

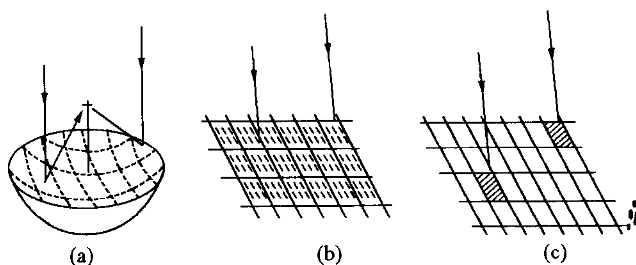


图 8-14 综合孔径射电望远镜结构 3 例

效应可以利用(图 8-15)。从射电源上看地球上放在北极附近的双天线干涉仪的两个天线 A 和 B,地球自转一周,其中一个天线将绕着另一个天线描绘出一个圆的路径。地球自转一周相当于把可移动天线 B 逐次地放到"等效大天线"的各个方向上,利用地球自转效应可以大大简化综合孔径的观测,把二维问题简化为一维问题,只需解决沿东西方向上各个单元之间的不同间距问题。实际上,由于系统的对称性,只需要 12 小时就能完成一组观测。当然,如果等效天线的面积很大,天线的数目很少,或仅有两面天线,为了获得东西向不同间距的观测结果也需要花费很长的时间。地球自转效应的应用大大节省了移动天线的次数,也大大减少了占地面积。最初的综合孔径射电望远镜也就发展成地球自转综

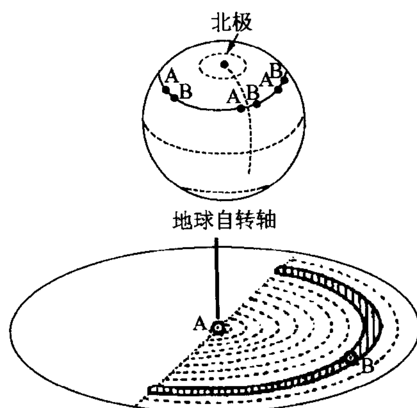


图 8-15 地球自转综合孔径射电望远镜原理示意图

合孔径射电望远镜了。

3. 剑桥大学综合孔径射电望远镜

1954年进行实验的综合孔径射电望远镜是一台实实在在的望远镜，但是由于所选的波长太长，分辨角太大，失去了实际的意义。全世界的天文学家都翘首以待强大的综合孔径射电望远镜的出世。赖尔当然比谁都急，但是他们遇到了一个当时无法解决的问题。

自有天文观测以来，资料处理从来没有像现在这样难倒过天文学家。但是，这个问题阻碍了综合孔径的发展脚步。在20世纪50年代计算机技术还处在很低的水平，计算速度慢，储存容量小，不能解决综合孔径所需要的计算问题。到了60年代，才有这样的计算机问世。

60年代剑桥大学陆续建成了三台综合孔径射电望远镜，它们的等效直径分别为0.8，1.6和5千米。在1960～1961年，赖尔和内维尔(Ann Neville)开始研制等效直径1.6千米综合孔径射电望远镜。这台综合孔径射电望远镜由3面直径18米的抛物面天线组成，其中2面固定，相距0.8千米。另1面天线放在长0.8千米的铁轨上，可以移动。实验观测得到了4.5角分的分辨率，证明利用地球自转进行综合的方法是成功的。1964年正式启用，用于普测射电天图和研究弱射电源，特别是射电星系的结构。

1971年剑桥大学建成的等效直径5千米综合孔径望远镜标志着综合孔径技术已经成熟。8面口径为13米的抛物面天线排列在5千米长的东西基线上，4面天线固定，4面放置在铁轨上，可在铁轨上移动。按照应该有多少种天线间距确定可移动天线依次放置的位置，在每个位置上观测12个小时。计算机处理资料后便得到一幅观测天区的射电源分布图，就好像对这个天区拍了一张照片。这台望远镜是专为绘制单个射电源的结构而设计的，除了它有很长的基线外，各个抛物面也更加精密，容许工作到2厘米的波长上。结果得到的角分辨率量级为1角秒，这个分辨率已经可以和高山台站上的大型光学望远镜媲美了。

剑桥大学综合孔径望远镜观测研究课题非常广泛，最有显示度的观

测是发现了一批河外射电星系，历史性地给出一批延展射电源的结构图。天鹅座射电源的图像是它的经典之作，见图 8-16，这个射电源有两个遥遥相对的射电展源，在它们之间有一个致密的点源是星系核。这类源称为射电双源。图像的细节表明是星系核连续地向两个展源提供能量。

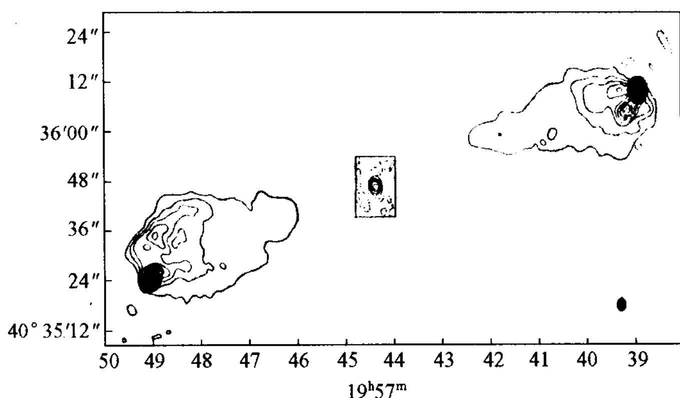


图 8-16　剑桥大学综合孔径射电望远镜获得的天鹅座射电源的图像

巡天也是剑桥大学综合孔径望远镜的主要的观测任务之一，它不仅有很高的分辨率，还有相当高的灵敏度，把观测范围从大约 10 亿光年扩大到大约 150 亿光年，几乎达到大爆炸宇宙理论中宇宙的边界，或追溯到宇宙的原初时期。这对宇宙学的研究至关重要。赖尔发现射电源的数密度随距离的增加而增多，但当距离大到一定程度以后，射电源的数密度又开始减少。这说明星系只在宇宙演化的某一个阶段才会大量地产生，在 100 多亿年以前宇宙中的射电源比近期的射电源多得多，最多时可达到现在的 1000 多倍。这一观测证明宇宙是在随时间的推移而变化着的，今天的宇宙不同于过去的宇宙。赖尔的研究工作成为支持大爆炸宇宙学的重要观测事实。

4. 综合孔径射电望远镜蓬勃发展

赖尔的成功在天文界引起了巨大的反响。美国天文学家立即开始

筹划、设计一个更大更好的综合孔径望远镜。他们又有钱又有技术，完全可以超越剑桥大学的综合孔径望远镜。从1961年开始筹划、设计，经过20年的努力，终于在新墨西哥州的一个荒原上出现了一个巨大的天线阵，整个基地占地1000多平方千米，比一个中等城市大得多，巍为壮观。

美国国家射电天文台的甚大阵(简称VLA)(见图8-17)，是当前世界最大的综合孔径射电望远镜。望远镜由27面直径25米的可移动的抛物面天线组成，分别安置在三个铺有铁轨的臂上，呈Y形。2个臂长是21千米，另一个臂长为20千米。工作波段可达到1厘米，因此天线抛物面的精度非常高。最高分辨角为0.13角秒，已经优于地面上的大型光学望远镜了。如果不是依靠自动化系统来控制和管理这样一个庞大的天线系统的运转，那是无法进行观测的。

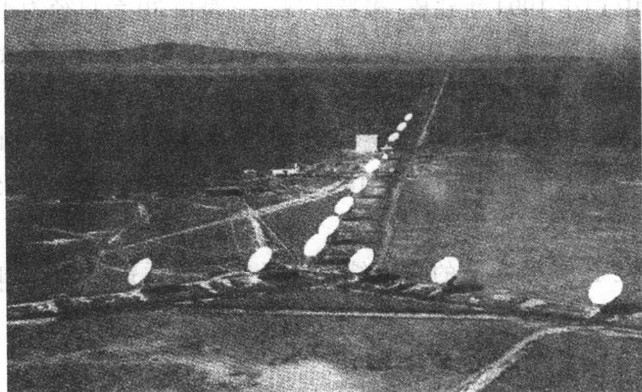


图8-17　美国国家射电天文台的甚大阵

1988年澳大利亚建成由6面22米天线组成的综合孔径望远镜(见图8-18)，基线长度6千米。工作频率在1.4～10 GHz之间的4个频段上。天线表面的中间部分加工精度最高，可以工作到115 GHz上，也就是短毫米波段。这一望远镜虽然不如美国的VLA，但是它地处南半球的优势却是任何北半球的大型射电望远镜所无法超越的。

第三世界的国家财力有限，不可能与发达国家攀比。他们选择工作频率比较低的频段来建造自己的综合孔径望远镜。射电源辐射的频段

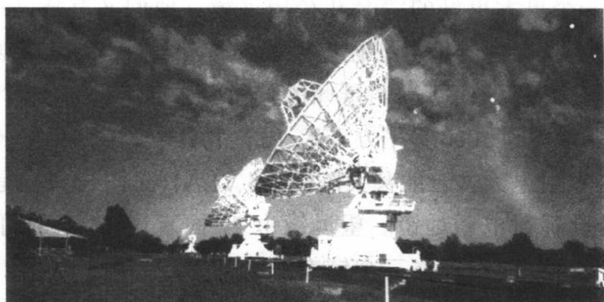


图 8-18　澳大利亚综合孔径射电望远镜

很宽，在低频段有其独特的性质，观测研究的科学意义也是很大的。当然，造价低也是不得不考虑的一个重要因素。印度米波综合孔径射电望远镜(GMRT)于 1994 年建成，相当壮观。它是由 30 台口径为 45 米的抛物线天线组成，其中 16 个天线构成中央区，范围为 1 千米，其余 18 个分布在 Y 形臂上，每个臂长为 14 千米。工作频率为 38 MHz 到 1420 MHz 范围中的 6 个频段。天线按 Y 形分布在 25 千米的范围内，中心区 5 千米的区域安排了 12 面天线。在 1420 MHz 频率上角分辨率为 75″。天线是网状的，造价便宜得多。

我国在 1985 年建成的密云综合孔径射电望远镜(见图 8-19)由 28

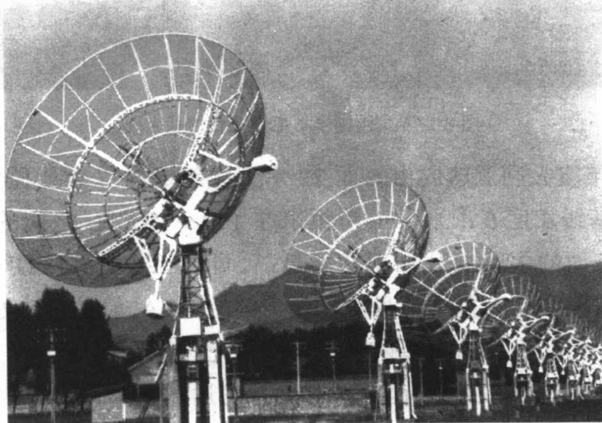


图 8-19　我国密云综合孔径射电望远镜

面口径为9米的网状天线组成，在优美的北京密云水库旁边，东西方向一字排开，总长1160米。工作频率是232 MHz和327 MHz。在232 MHz上的分辨率约4′。由于采用28面天线，不需要移动天线来获得不同的天线间距，因此工作效率很高，两天的观测就可以完成一张观测天区的射电源分布图。观测天区的尺度由单天线的口径决定，9米的天线不大，但带来的好处是综合孔径望远镜的视场比较大，约为10°。已在巡天观测发现新射电源和研究比较大的射电展源方面取得丰硕的结果。

六、甚长基线干涉仪系统的发展

高分辨率是天文学家追求的目标，在理论上干涉仪的两面天线间距可以达到几百千米，几千千米甚至几万千米，分辨率就可以提高几万倍，甚至几十万倍。但是传统的干涉仪必须用馈线把两面相距非常远的天线连接起来，而馈线由于漫长路途上的环境差异，产生诸如热胀冷缩等现象，所传输的天体信号的相位发生变化，将使干涉仪不能工作。

天文学家改用微波发射的方法来传送信号，使天线基线距离达到几百千米，但分辨率仍不是很理想。甚长基线干涉仪的发明终于使射电望远镜的分辨率超过光学望远镜的美妙“梦想”得以实现。其方法就是取消任何连接。

1. 甚长基线干涉仪(VLBI)原理

这种神奇的干涉仪既不要馈线传输，也不要微波接力。两面相距特别遥远的射电望远镜同时观测同一个射电源，各自独立地把观测到的信号记录在磁带上，然后把两面天线的资料拿到一起，用一台相关器进行处理，就得到双天线干涉仪的观测结果。其中关键的技术是把极端稳定的原子钟应用到干涉观测(图8-20)。

如果两台射电望远镜记录在磁带上的信号是同一个射电源同一时刻发出的同一频段的信号，把两个射电望远镜观测得到的信号相加就能产生干涉。实现这“三个相同”后，用记录在两个磁带上的信号相加与用

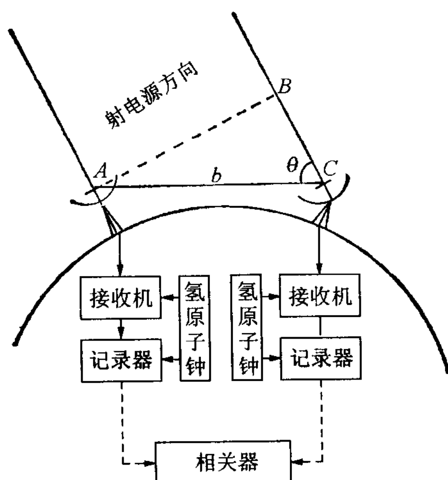


图 8-20 甚长基线干涉仪原理

馈线传送信号相加的效果完全一样。天线对准同一个射电源容易做到,同时观测则利用极端准确的原子钟在磁带记录上打上极其精确的时间标记来解决。

射电望远镜天线接收到天体的射电辐射后,经过低噪声的放大器放大,由变频器将频率从高频降至中频。变频器的部件是本机振荡器,如果本振频率发生变化,就会使接收天体的频率范围发生变化。一般的射电干涉仪两台望远镜使用同一个本机振荡器,因此当本机振荡器的频率不稳,两台射电望远镜接收的频率同步地变化,所以能保证两台射电望远镜接收的是相同的频段。甚长基线干涉仪取消馈线连接,只能采用两个独立的本机振荡器,如果它不稳定,就不可能进行干涉观测。好在原子钟的频率极端稳定,氢原子钟的频率稳定度已经达到 10^{-14},甚至 10^{-15}。用原子钟作为本机振荡器,解决了这个困难。

双天线干涉仪只有一维的分辨率,但多台射电望远镜组成的干涉仪具有不同方向的基线,可以用与综合孔径射电望远镜类似的方法获得射电源的两维图像。由于参加甚长基线干涉观测网的射电望远镜都是固定的,不能把望远镜移动到不同的地方进行多次测量,而且等效天线太

大，达到几千千米甚至超过万千米，望远镜的数目有限，所得的图像质量不如综合孔径射电望远镜。甚长基线干涉网所包含的射电望远镜越多，分布越合理，观测质量就越高。从目前获得的高分辨率的观测结果来看，成像质量还是令人满意的。

多台射电望远镜可放在一个国家的不同地区，不同的国家，不同的洲，甚至可由地面上的射电望远镜与太空中的卫星上的天线组成甚长基线干涉。目前光学望远镜最高分辨率是哈勃空间望远镜的 0.05 角秒，而甚长基线干涉网的观测已经远远超过，达到了 1～0.01 毫角秒(mas)。更诱人的将是在月球甚至在火星上建立 VLBI 的射电望远镜，与地球上的射电望远镜群进行干涉观测，21 世纪将是空间 VLBI 大发展的时代。

2. 英国多天线微波连接干涉仪系统(MERLIN)

在介绍当今流行的甚长基线干涉系统以前，了解一下基线达到 217 千米的英国多天线微波连接干涉仪系统是有益的。这个系统取消了馈线连接，改为用微波连接的方法使基线长度超过 200 千米。它的分辨率又比美国甚大阵(VLA)提高了约一个数量级，在 6 厘米波段上的分辨率已比独领风骚的哈勃空间望远镜高出一点，而在最短工作波段 13 毫米波长上，达到 0.01 角秒，比“哈勃”的分辨率高出 5 倍。

MERLIN 是当今最完善的干涉仪系统，也是英国国内最高分辨率的射电望远镜系统。如图 8-21 左所示，它由 7 台射电望远镜组成，总部设在焦德尔班克。其最基本的单元是总部的 76 米口径洛弗尔射电望远镜或 Mark II 射电望远镜，工作时只用其中的一台。有 3 台在离总部 20～30 千米的三个地方，一台是与 Mark Ⅱ 相似的 Mark Ⅲ，口径为 25×38 米，另 2 台的口径为 25 米。还有 2 台 25 米口径射电望远镜分别放置在距离 100 多千米的 Knockin 和 Defford。最远的一台是 1990 年建造完成的 32 米口径射电望远镜，放置在剑桥大学穆拉射电天文台附近。由于原来的 6 台射电望远镜的分布基本上是南北向的，在东西向的基线只有几十千米，这是个致命的缺点。剑桥这个点的建立使基线长度达到 217 千米，并具有很长的东西向基线，大大提高了望远镜的分辨率和成像质

量。MERLIN 的工作频段从 151 MHz 到 24 GHz(即 200 cm 到 1.25 cm)。

采用微波接力方法顺利地解决了总部与各个射电望远镜之间的信息传递问题这个难题。这个系统是世界上唯一的。三种独立的通道保证各个射电望远镜与总部的联系和信号传送畅通无阻。微波发射站的建立是关键,发射和接收微波信号的小型抛物面天线放置在高高的铁塔上(见图 8-21 右),对于远在 200 多千米之外的剑桥的 32 米射电望远镜,需要 5 次接力。

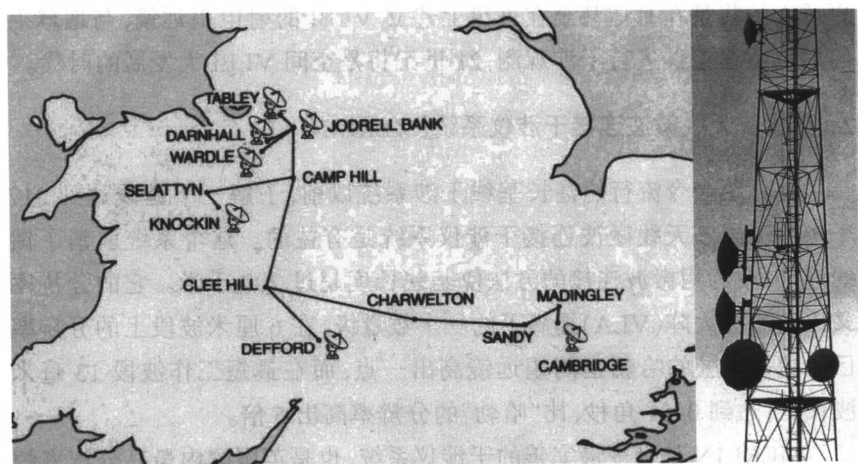


图 8-21 MERLIN 的分布图,图上标明了 7 台射电望远镜的位置和微波接力站的情况(左)及 MERLIN 的微波接力铁塔(右)

3. 欧洲甚长基线干涉网和中国的甚长基线干涉观测

甚长基线干涉观测要求有足够长的基线,欧洲地区射电天文学发达,但是每个国家的国土都不够辽阔,最迫切的是想突破国家的局限。1980 年由德国、意大利、荷兰、瑞典和英国联合建立欧洲地区的甚长基线干涉观测网,简称 EVN。很快就扩展至欧洲各国。总部设在荷兰。

欧洲网所覆盖的地区还不够大,分辨率不高。因此其对我国上海和乌鲁木齐的 25 米射电望远镜特别感兴趣,力邀我们参加欧洲网。欧洲

网扩大到了亚洲，还有非洲的南非，形成具有非常长基线的 VLBI 网，成为世界上分辨率和灵敏度最高的 VLBI 网。图 8-22 左边是欧洲网 VLBI 的射电望远镜的分布。

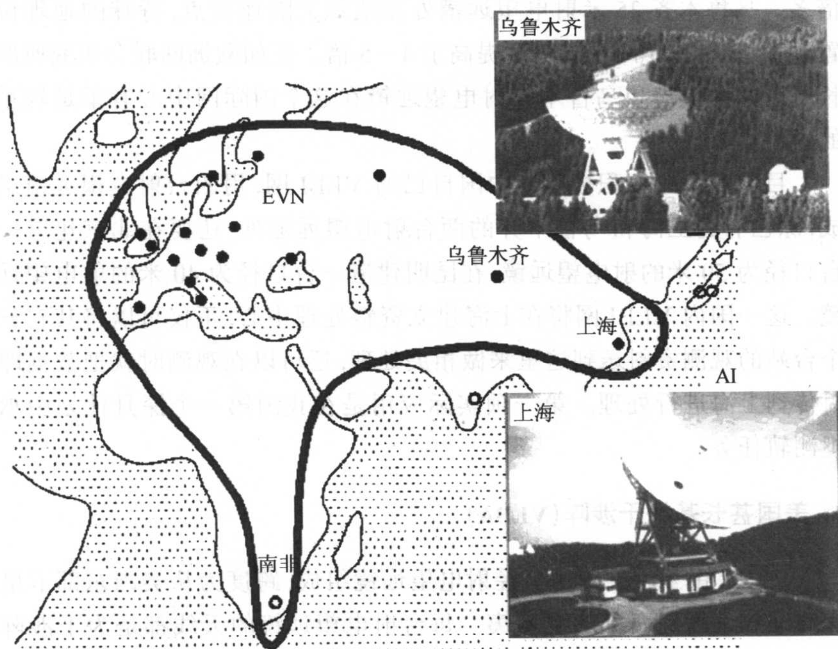


图 8-22　欧洲甚长基线干涉观测网中望远镜的分布及上海和乌鲁木齐的射电望远镜

欧洲网中的射电望远镜，接收系统和记录终端采用统一标准，目的是要进行联网观测，要升级，大家一起升级。记录的观测数据要送到国际联测的数据处理中心去统一处理，处理中心备有相关处理器和多种软件系统。我国的甚长基线观测技术水平是与国际同行相当，与时俱进，共同提高的。

欧洲网的观测按照统一的计划进行，每年分为 3 个观测期，每期 3～4 星期，一般地用 3～4 个波段进行观测。观测课题的申请要经过专门的委员会审查通过才能分配到观测时间。

我国上海和乌鲁木齐的两台25米射电望远镜以其巨大的地理位置的优势跻身于世界之林(图8-22右)。以在欧洲网中的地位来说,上海25米口径射电望远镜的加入,使基线长了3倍多,也就是提高分辨率3倍多。乌鲁木齐25米射电望远镜处在欧亚大陆连接点,特殊的地理位置,使欧洲VLBI网观测精度提高了4~5倍。正如欧洲网联合研究所所长所说的:"上海和乌鲁木齐射电望远镜在这个国际网中占有举足轻重的地位。"

目前我国正在积极筹建中国自己的VLBI网,用四台射电望远镜组成,除已有的上海和乌鲁木齐的两台射电望远镜外,还要在北京建造一台口径为50米的射电望远镜,在昆明建造一台口径为40米的射电望远镜。这一国内VLBI网将在上海建立资料处理中心,不仅可以将其它三个台站的观测资料送到这里来做相关处理,还可以在观测时就把数据即时传到上海进行处理。第一项实际应用是在我国第一个探月计划中承担测轨任务。

4. 美国甚长基线干涉阵(VLBA)

VLBA由10台25米口径射电望远镜组成,跨度为从美国东部卡里宾的维尔京岛到西部的夏威夷。每台射电望远镜的天线都是为干涉阵新设计的。总的经费为8500万美元,1986年开始建造,1993年5月最后完成。天线的运转由设在新墨西哥州的Socorro的望远镜阵工作中心控制,每台射电望远镜的观测数据先是记录在磁带上,然后送到这里进行分析处理。

10台射电望远镜的天线和接收机系统都一模一样,它们的分布是按照甚长基线干涉观测的要求来安排的,基线最长8600千米,最短200千米。射电望远镜的分布见图8-23。这个属于一个国家的射电望远镜组是世界上最大的VLBI观测的专用设备,全部时间都用来进行甚长基线干涉观测,分辨率高,观测资料处理方便,图像质量很高。而其它VLBI国际网是由已有的射电望远镜加盟组成,每年只能有很少时间进行VLBI观测。

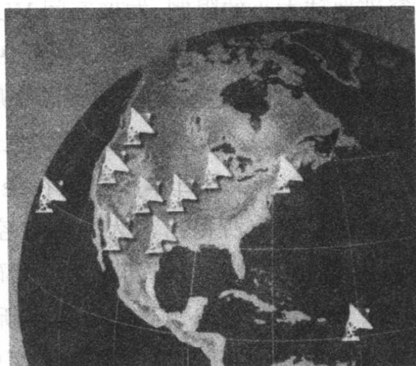


图 8-23　VLBA 的 10 台射电望远镜分布

VLBA 的接收机共分 10 个频段，从 330 MHz 到 86 GHz（即 90 cm 到 3.5 mm）。10 台射电望远镜都能工作在 3.5 毫米处，这一点非常宝贵。由于 VLBI 的分辨率与波长成反比，在 3.5 毫米处的分辨率要比 3.5 厘米波长时高 10 倍，比 35 厘米波长时高 100 倍，VLBA 毫米波的分辨率达到了亚毫角秒级(即小于毫角秒)，成为解决天体物理学中某些疑难问题的关键观测设备。

毫米波观测对天气条件的要求非常苛刻，有雨或有云的天气都不能进行观测。VLBA 的 10 台射电望远镜分布在 8600 千米的广阔地带，各个地方的自然环境很不相同，有的与著名的基特峰天文台为邻，有的在荒芜的高山上，有的在海边。1 年中 10 个台站同时处在适合毫米波观测天气条件的时候很少。由于 VLBA 是专用的甚长基线干涉设备，有足够的观测时间，对于一些特殊的观测课题，设立了动态观测时间的申请，当 10 台射电望远镜台站同时具备所要求的天气条件时给予观测时间。我国年轻学者沈志强博士就曾申请到一次这样的观测，在 3.5 毫米波段观测研究银河系中心的射电源 SgrA*，虽然足足等待了一年多，但得到的是非常成功的观测结果。

5．日本甚长基线干涉空间观测站(VSOP)

天文观测对分辨率的要求是无止境的，宇宙有探之不尽的奥秘，细

节之下,还有细节,突破地球大小的限制,发展空间 VLBI 技术,进一步提高空间分辨率成为天文学家的追求。从 1986 年至 1988 年相继由日本的 64 米、45 米和澳大利亚 70 米射电望远镜与美国宇航局的工作数据传送卫星天线(4.9 米)在 2.3 GMHz 和 15 GMHz 频率上进行空间 VLBI 干涉观测实验,获得成功。1987 年 3 月日本科学家在经过几年的筹划后,正式向当时的日本宇宙科学研究所提出名为"VLBI 空间天文台计划",简称 VSOP。1988 年得到经费支持,1989 年正式开始研制。

1997 年 2 月 12 日,日本科学家采用三级全固体新型 M5 运载火箭,把专用的口径为 8 米的射电望远镜卫星发射到太空中,成为首枚空间 VLBI 卫星。射电望远镜的反射面像一把伞一样,发射时是收拢起来的,发射成功后,才把射电望远镜的副反射面和主天线面展开,卫星总重量约 800 千克。观测频段在 1.6 GHz(18 cm), 5 GHz(6 cm)和 22 GHz(1.3 cm)。卫星上还配置了太阳能帆板、恒星跟踪仪和通讯天线。通讯天线用于接收 5 个分布在地球上的地面跟踪站的信号及发回射电天文观测数据。卫星轨道周期约 6 小时,近地点为 560 千米,远地点为 21 000 千米。这颗卫星原名 MUSES-B,发射成功后重新命名为 HALCA,是"极先进的通讯和天文实验室"英文的首字母缩写,在日语中表示遥远(haru-ka)的意思。

空间射电望远镜与地面射电望远镜组成的 VLBI 系统的基线超过地球赤道处直径的 2.5 倍,是地面上那些已利用的基线长度的 3 倍,角分辨率可达 60 微角秒,成为当今空间分辨率最高的天文望远镜(见图 8-24)。同地面观测台一样,观测时利用原子钟准确的时标给数据流打上时间标记,利用原子钟准确而稳定的频率作为本机振荡频率,以保证与地面的射电望远镜同时观测同一天体的相同波段的辐射。不同的是,卫星上没有携带氢原子钟,是通过卫星上的天线接收由地面站的氢原子钟导出的时间信号作为频标,其数据记录系统也在地面跟踪站。

这个由日本牵头的国际合作项目,有日本宇宙科学研究所和国家天文台、美国宇航局的喷推实验室、加拿大航天局、澳大利亚国家望远镜设备、欧洲的甚长基线干涉观测网和甚长基线干涉观测联合研究所等参

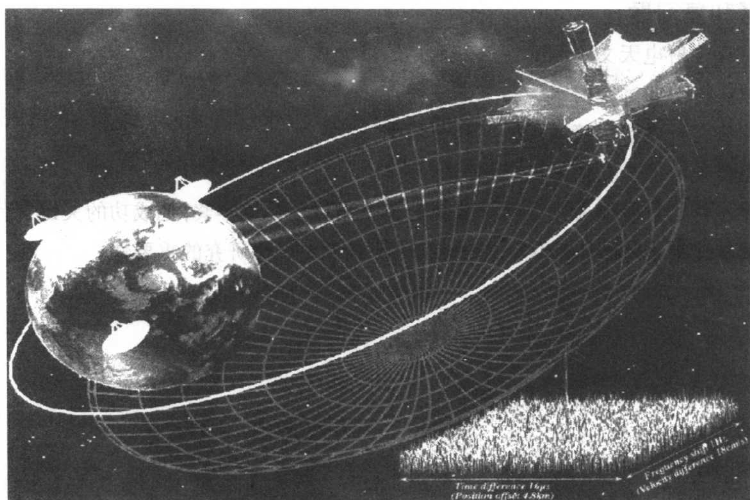


图 8-24　甚长基线干涉空间观测站(VSOP)

加。地面上已有的 VLBI 观测网和深空观测射电望远镜等都与 HALCA 合作共同观测，其中最重要的有美国的 VLBA、欧洲 VLBI 网和一个从澳大利亚延伸到南非的一个南半球阵。我国上海和乌鲁木齐的两台 25 米口径的射电望远镜已经多次参加空间 VLBI 的观测。

HALCA 卫星的预期寿命是 3 年，但天文观测一直进行到了 2003 年 10 月，实际寿命为 6 年半多，现在卫星还在轨道上运行，但已经无法控制卫星姿态，失去了进行天文观测的能力。

2001 年 8 月在日本宇宙科学空间研究所召开关于 VSOP-2 的国际会议，来自世界各国的科学家共商下一代 VSOP 的计划。下一代空间 VLBI 将有一台在太空绕地球运转的口径为 10 米的射电望远镜，该射电望远镜天线采用偏轴抛物面，以提高接收效率。卫星总重量约 910 千克，运动轨道将与 VSOP 大致一样，绕转轨道与赤道倾角是 31 度，轨道周期约 7.5 小时，近地点在 1000 千米，远地点在 25 000 千米。工作频率是 8 GHz，22 GHz 和 43 GHz，最高频率比 VSOP 提高了约 10 倍，角分辨率也将相应提高 10 倍。此外，VSOP-2 可同时进行双偏振观测和相位参考观测。该计划目前还在完善中，预计在 2010 年或稍后的时间里发射。

思考和复习题：

1. 试评述射电天文观测的特点和取得的巨大成就。
2. 叙述射电望远镜的结构和工作原理。
3. 什么是射电望远镜的灵敏度和分辨率？
4. 扼要说明综合孔径射电望远镜的原理。
5. 评述赖尔对射电天文学的贡献和他荣获诺贝尔物理学奖，他成功的关键是什么？
6. 试叙述甚长基线干涉仪的工作原理，及对天文观测研究的重要性。

第九讲

脉冲星和中子星

脉冲星的发现曾轰动世界。1967 年英国天文学家休伊什教授和他的研究生乔斯林·贝尔女士一起发现了脉冲星,找到了物理学家 30 多年以前预言的中子星。中子星的质量和太阳相当,但半径只有 10 千米,是一种具有超高密、超高压和超强磁场的天体。中子星的发现不仅为天文学开辟了一个新的学术领域,而且对现代物理学的发展产生了重大影响,导致了致密物质物理学的诞生。1974 年,美国天文学家泰勒和他的学生赫尔斯发现射电脉冲双星,尔后又间接地验证了这一双中星系统的引力辐射。爱因斯坦预言的引力辐射终于在半个多世纪以后得到了第一例证据。在休伊什荣获 1974 年度诺贝尔物理学奖之后,赫尔斯和泰勒又在 1993 年获此殊荣。在天文学中迄今仅有脉冲星的研究这一项目两次获得诺贝尔奖。

1982 年美国天文学家贝克和库尔卡尼发现了宇宙中自转最快的毫秒脉冲星,确认它们与 X 射线脉冲双星的演化关系,并成为探测球状星团的探针。毫秒脉冲星行星系统的发现开创了寻找太阳系之外行星系统的先河。其周期的长期稳定性超过了原子钟,已经显示出具有实际应用价值的前景。毫秒脉冲星的发现使中子星的研究领域更加广阔。

一、脉冲星的发现

中子星的预言曾使天文学家无所适从,不知道如何去发现这种超高密的天体。英国天文学家休伊什教授和他的研究生乔斯林·贝尔女士在进行行星际闪烁的观测中偶然地发现了脉冲星,也就是中子星。这一发现具有极大的偶然性,但当时射电天文观测技术和观测研究的发展程度已使这种偶然发现成为必然。

1. 中子星的预言

原子核由质子和中子组成这一普通知识在1930年以前连物理学家都不知道。那时只知道原子核中有质子存在。1931年,查德威克发现了一种质量和质子一样,但不带电荷的新粒子,取名为“中子”。中子发现的意义远远超出原子物理学的范围,人们马上要问,“宇宙中有没有完全由中子组成的恒星?”苏联物理学家朗道在知道发现中子之后仅几个小时就回答了这个问题,他指出宇宙中存在中子星,它非常小,非常致密,辐射非常微弱。1934年兹维基和巴德各自提出了比较完整的中子星理论,并指出“中子星是大质量恒星演化到超新星爆发之后的遗留物;是因为恒星的坍缩而在其核心形成了中子星。”(见图9-1)但是,究竟有没有中子星还得由观测来证实。这可难倒了天文学家。

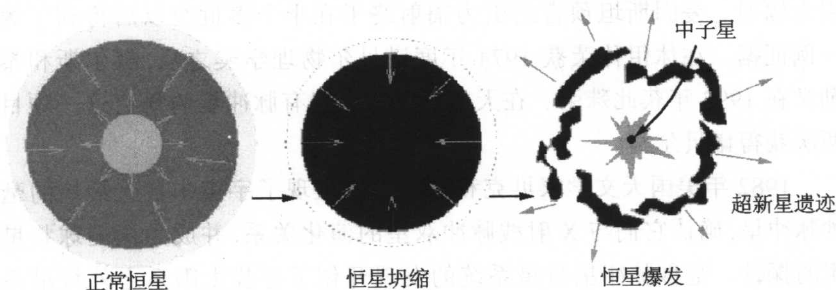


图9-1 中子星形成与超新星爆发示意图

2. 中子星在哪里？

当人们第一次听到这种小得惊人、密度大得出奇的恒星，一定会问，真有这样的恒星吗？中子星太不寻常了，连不少天文学家也都提出疑问。即使所有天文学家都对中子星的存在深信不疑，怎样去寻找中子星仍然是一个没有任何头绪的难题。

在那时，光学天文学已非常发达，人类所获得的天文学知识绝大多数来自光学望远镜的观测结果。天文学家首先尝试用光学望远镜搜寻中子星，但没有成功。一般认为，光度与恒星的表面积成正比，中子星半径只有 10 千米，表面积很小，它的光度要比普通恒星低几十亿倍，因此光学望远镜找不到也是很自然的。

蟹状星云超新星遗迹的研究把中子星问题提到日程上来。蟹状星云是一个在射电、光学、X 射线、γ 射线各波段都有很强辐射的源（见彩图 27）。它的辐射很强，与十万个太阳相当。其辐射特征表明是高能电子在磁场中绕磁力线作螺旋运动时所发出的同步辐射。蟹状星云是一团稀薄的气体，超新星爆发时所产生的高能电子早已衰弱，如此强的同步辐射，其能量来自何方？源源不断的高能电子来自何方？磁场是怎样形成的？光学观测发现蟹状星云在膨胀，每年大约 0.2 角秒左右，而且膨胀速度在加快。星云膨胀加速度的能量由谁来提供？这一系列问题成为天文学家观测和理论研究的热点。

蟹状星云的研究已经明白地指出在该星云中必定有一个向星云提供能源和高能电子的天体，那就是中子星。意大利天文学家帕齐尼（Pacini）在 1967 年就预言，“在蟹状星云中存在一个由中子组成的星，它每秒自转多次，有很强的磁场，磁偶极辐射给星云以能量”。这一预言十分准确，不仅后来在蟹状星云中发现了中子星，而且中子星确实具有预言所指出的物理特性。当时天文学家在蟹状星云中进行了多次搜寻，找到一颗视星等为 18 等的星。由于没有查出它与其它恒星有什么不同的地方，也就放弃了。而这颗星恰恰就是极少数具有光学脉冲辐射的中子星。30 多年过去了，依然没有找到中子星的踪迹，主要原因有两点：一是

天文学家对中子星的自转异常快，辐射在射电波段很强以及是以短促的脉冲形式等特性一无所知。二是常规的光学天文观测常常追求比较长的曝光时间，射电观测则采用较长的时间常数，都是为了累积比较多的能量，提高灵敏度。然而，这样一来，所有短周期脉冲信号都被平滑掉。自然，所有搜寻都失败了。后来，休伊什和贝尔在进行行星际闪烁观测研究的过程中偶然地发现到了。这真是“踏破铁鞋无觅处，得来全不费工夫”。

3. 休伊什和行星际闪烁的研究

休伊什1924年5月11日出生在英格兰。中学毕业后进了剑桥大学，时遇第二次世界大战，参军后参与机载反雷达设备的研究。战后回到剑桥大学继续学习，后来进入卡文迪什实验室工作，获博士学位后留在卡文迪什实验室。

休伊什教授之所以“幸运”地发现了脉冲星，在于他孜孜不倦地从事行星际闪烁的观测研究。行星际闪烁就是射电源发出的无线电波经过星际介质时产生的忽强忽弱的变化，就像在晴朗的夜晚，我们看到星星在向我们眨眼一样。所不同的是我们肉眼看见的星星的闪烁是由于地球大气对流层中空气密度的不规则变化和扰动对光波的影响，而射电望远镜看到的闪烁是由含有带电粒子的介质的影响。地球的高层大气和太阳的日冕都是电离气体，行星际空间到处都有由太阳风所带来的密度不均匀的等离子体，它们都会使射电波发生闪烁。如果射电源的角径较大，可以看成是许多小角径源的组合，在同一时刻这个变强，那个变弱，观测到的平均效果就没有什么起伏变化。所以，只有角径很小的射电源通过行星际空间才有闪烁现象，行星际闪烁的这个特点被应用来判别射电源的角径。

早在1948年，休伊什就开始研究射电源强度起伏的现象。1965年，他发现蟹状星云中存在一个致密成分，其角径只有约0.2角秒，亮温度达到10^{14} K。当时他就指出这个致密成分可能是1054年超新星爆发的遗留物。可惜，他并没有认识到这个致密源就是中子星。从1948年到

1967年发现脉冲星的近二十年间，他在行星际闪烁的观测和理论方面的成就使他成为这一领域的权威学者。他的研究表明，闪烁情况与波长有关，在米波段只有角径小于0.5～1角秒的射电源才会出现行星际闪烁。

当时的行星际闪烁研究进行得很红火，这是由于受到类星体发现的激励。类星体具有像恒星那样小的角径(小于1角秒)，它们是迄今为止天文学家所知道的距离最遥远、能量最大的天体。由于类星体在宇宙学和天体物理学上有着极其重要的意义，很快就引起射电天文学家的极大兴趣，形成搜寻类星体的观测热潮。

1965年，剑桥大学射电天文台休伊什教授领导的研究组为从已发现的射电源中寻找类星体的候选者，决定研制专门用于观测行星际闪烁的大型射电望远镜。

由于类星体是离我们特别遥远的河外射电源，到达地球的流量密度特别微弱，必须要有足够大的天线面积。行星际闪烁在米波段比较强，所以选择了3.7米波长，选择米波段还有一个好处就是技术简单、造价便宜。天线阵覆盖的面积相当大，长470米，宽45米。天线阵共有16排，每排128个振子，共2048个振子。天线接收面积达2万1千多平方米(见图9-2)。这种闪烁现象是快速的，在秒的数量级。因此要求望远镜

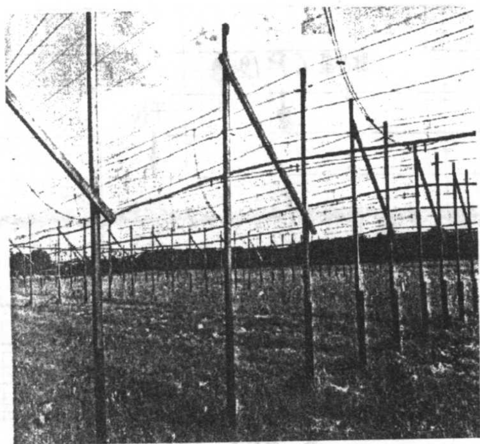


图9-2　剑桥大学行星际闪烁射电望远镜

具有很高的时间分辨率。恰好某些脉冲星的周期比米波段的行星际闪烁时标要长。谁也没有想到这台造价很低、构造比较简陋、功能单一的“行星际闪烁”射电望远镜却为发现中子星铺平了道路。

4. 乔斯林·贝尔和脉冲星的发现

乔斯林·贝尔(Q. Bell)在英国格拉斯哥大学获物理学学士以后就想攻读天文学博士学位。报考的是焦德尔班克射电天文台，可是由于工作人员把她的申请信丢失，鬼使神差地使她转向剑桥大学，成为休伊什的博士生。这一变动使她有缘脉冲星的发现。

贝尔女士到剑桥大学后，立即投入望远镜的建设达2年之久。1967年7月，望远镜建成，随即投入观测。贝尔的博士论文就是行星际闪烁的观测。贝尔按计划对一批射电源挨个地进行观测，每周重复一次，每天的记录纸有七八米长。6个月的观测取得5.6千米的记录纸的原始资料。望远镜非常灵敏，天体信号与周围环境的干扰一并记录下来。从原始记录上可以看出，脉冲星信号与干扰信号很相像(图9-3)。贝尔的重要任务之一就是要判别闪烁源和干扰信号。直观看来往往不易区分，因此要求每隔一周重复观测一次，如果是信号每次会在同一方向出现，而干

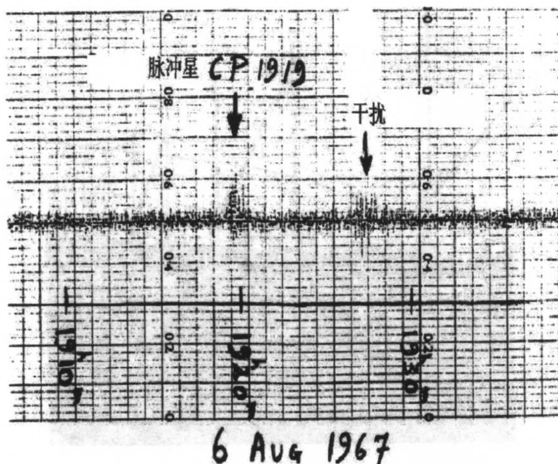


图9-3　发现脉冲星的原始记录：与噪声相仿的脉冲星信号

扰则不然。由于在同一天区反复巡查，当然碰上脉冲星的机会不会少。

8 月，贝尔注意到一个夜晚出现的不寻常“闪烁源”，因为夜晚观测者背靠太阳，受太阳风影响很小，因此在夜晚不会观测到很强的闪烁源。在贝尔发现闪烁源的这个方向上并没有要观测的射电源。贝尔紧紧地盯住这个闪烁源。最后，他们排除了干扰信号的可能性，确认是来自太阳系外的信号，此外也否定了“太阳系外的智能生物发来的电报”的猜想。

由于这个源时隐时现，一直等到 11 月 28 日，贝尔才完美地把这个起伏信号记录下来，发现是一系列强度不等但时间间隔约为 1.33 秒的脉冲。最后确认信号源为脉冲星，取名为 CP1919，CP 为剑桥大学脉冲星的简称，1919 是脉冲星的赤经。贝尔从过去长达 5000 多米的记录纸中查找，又发现了 3 颗脉冲星。天文学家曾经给脉冲星取过各种名字，最后采用澳大利亚学者提出的命名法，即用脉冲星的英文字“pulsar”的简写 PSR，加上这颗星在天球上的赤经和赤纬来表示。由于银河系的自转，脉冲星的赤经赤纬值是要变化的，约定将发现时测量的赤经赤纬值归算到 1950 年时的值，后来改为归算到 2000 年的值，并以 PSRJ 替代 PSR，增加一个英文字母 J。归算为 1950 年的赤经赤纬的脉冲星则用 PSRB 表示。

在证认新发现的脉冲信号是什么的过程中，作为一种可能性，休伊什曾探讨过“地球之外的高等智能动物发来的电报信号”的可能性。因为这种周期信号很像我们地球上的电报信号，也曾把最初发现的几个脉冲星取名为“小绿人 1，2，3，4 号”。图 9-4 是最先发现的 4 颗脉冲星之一

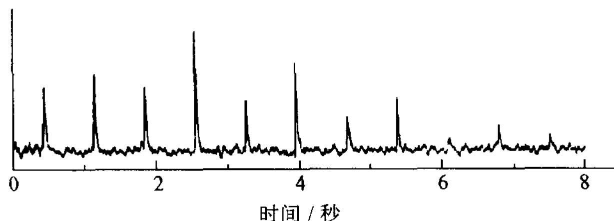


图 9-4　最先发现的 4 颗脉冲星中最强的一颗 PSR0329 + 54 的脉冲信号

的记录。随着脉冲星发现的增多,发现来自四面八方的脉冲信号的周期虽不同,但都用同一种电报方式,球外智能生命在同一个频率上和人类联系,这是不可能的。而且,如果是高等智能动物发来的电报信号的话,他们只能住在围绕恒星运动的行星上,在脉冲信号中就会包含了行星轨道运动的信息,但是并未发现这种信息。

二、脉冲星是高速自转的磁中子星

脉冲星的发现也曾使天文学家感到困惑,观测到的 1 秒左右的脉冲周期不可能用当时已知的各种天文周期现象来解释。人们认真地考虑过这是否是地外文明社会发来的电报信号。探求短周期脉冲的来源导致理论研究的深入发展,最终一致公认,脉冲星就是快速自转的磁中子星。发现者之一的休伊什教授荣获 1974 年诺贝尔物理学奖。

1. 脉冲星是什么?

脉冲星的观测带给我们非常多的信息,最重要的是它们的辐射呈现出周期性的脉冲。脉冲的周期很短,比以往所知道的天文上众多的周期现象中最短的还要短很多。周期的范围扩展至 1.56 毫秒到 8.5 秒。最早发现的 4 颗脉冲星中,周期最短的是 PSR 0950+08,为 0.25 秒。脉冲星的周期随时间的推移缓慢地增加。周期变化率在 $10^{-13} \sim 10^{-20}$秒/秒之间。脉冲星辐射的脉冲宽度只占一个周期的很小一部分,平均只有 3%。脉冲星周期的特性给天文学家出了难题。脉冲星究竟是什么天体的问题就要看哪一种理论能圆满地解释它们的周期特性。首当其冲的是要回答:脉冲星的周期为什么这么短? 这么稳定? 为什么周期会缓慢地变长?

天文上周期性现象是常见的。每个天体都有自转的周期现象。双星系统还有类似公转的轨道周期现象。有些天体还会有膨胀与收缩的脉动周期现象。但是脉冲星如此短而准确的周期现象,人类还是第一次遇到。

关于脉冲星是什么的探索、思考和争论，集中在下面三种可能性：双星的轨道运动，恒星的径向脉动和恒星的自转周期。不管是哪一种机制，要获得如0.25秒这样短的周期，只能是物理学家预言的中子星。由于脉冲星的周期是逐渐变长的，而且周期又极端稳定，与双星轨道运动和径向运动的周期特性不相符。中子星自转周期则可能具备这样的特性，因为中子星是一个直径只有20千米、质量大于1个太阳质量的刚体，自转周期自然极端稳定。理论预言的中子星，已经没有热核反应，辐射只能依靠自转能的减少来维持，这就导致中子星的自转越来越慢，也就是观测到的周期逐渐变长。

2. 休伊什荣获1974年诺贝尔物理学奖

休伊什和贝尔发现脉冲星的论文发表在1968年2月的英国《自然》杂志上。论文宣布发现了一种极为奇异的天体射电源，它在太阳系之外，发射短暂而极有规律的无线电脉冲，取名为脉冲星。论文指出，脉冲星的密度非常大，很可能就是中子星。但是，论文中提出脉冲周期是中子星径向振荡的反映却是不正确的。

快速自转磁中子星最完美地解释了脉冲星的观测特性，这要追溯到脉冲星发现以前帕齐尼的论文。脉冲星就像他所描述的"它每秒自转多次，有很强的磁场，它的磁偶极辐射不断地给蟹状星云提供能量"。由托马斯·歌尔德(T. Gold)提出的中子星的磁极冠辐射模型则是对脉冲星辐射的脉冲特性作了最权威的解释。歌尔德的模型也认为中子星具有非常强的磁场，仅仅在磁极冠这个很小的局部区中，由带电粒子在磁场中运动发出曲率辐射，形成一个方向性很强的辐射锥，就像灯塔发出的两束光一样。辐射锥的中心是磁轴，磁轴和自转轴不重合，当辐射锥和中子星一起转动扫过地球上的射电望远镜时，我们就接收到一个脉冲。磁极冠辐射模型示意图见图9-5。这一模型成为证认中子星存在的最关键的一步。从此，天文学家对脉冲星就是磁自转中子星的结论深信不疑。30多年前理论预言的中子星终于找到了。

由脉冲星的平均脉冲轮廓图的分析得出脉冲星的辐射锥是一种"核

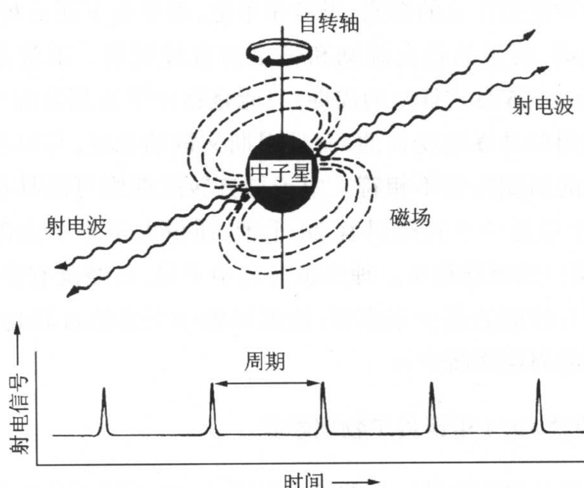


图 9-5　脉冲星的磁极冠模型

—锥"结构，中心辐射很强，称为核成分，围绕着核有 1 个或 2 个锥环，也有比较强的辐射，图 9-6 左边给出的是一个锥环。视线扫过辐射锥的不同部位，给出不同的脉冲轮廓，图 9-6 右图给出 3 峰、双峰和单峰三种情况。

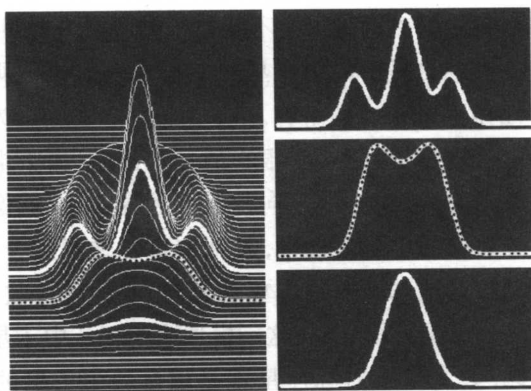


图 9-6　脉冲星"核—锥"模型和多种多样的脉冲轮廓

高速自转的中子星的质量与太阳相当，具有大得惊人的密度，每立方厘米约有一亿吨重。中子星的超高密、超高压、超强磁场和它内部的中子流体具有的超流、超导等物理特性使之成为一个地球上不可能有的物理实验室。

休伊什由于和贝尔一起发现了脉冲星，并把它证认为 30 多年前物理学家预言的中子星，获得了 1974 年诺贝尔物理学奖的殊荣。休伊什教授获奖是当之无愧的。但是乔斯林·贝尔女士的重要贡献也是不容抹杀的，诺贝尔物理学奖确实应该同时授予他们两人。天文界许多人士都认为，只授予休伊什一人，而完全忽视了贝尔的贡献是不公正的。

贝尔首先从一大堆“干扰”信号中发现不寻常的“闪烁源”，穷追不舍，最终发现了脉冲星。正像著名脉冲星专家曼彻斯特和 J. 泰勒在专著《脉冲星》的第一页写的那样：“没有她有洞察力的、百折不挠的努力，我们现在可能无法分享到研究脉冲星的这份快乐。”实际上，早在脉冲星发现以前 10 多年，国际上有好几台大型射电望远镜就已具备发现脉冲星的能力，而且还多次记录到来自脉冲星的信号，但是观测者们没有察觉，以致失之交臂。很清楚，没有贝尔精细过人的工作和坚忍不拔的精神，也会失去发现脉冲星的机会。

贝尔博士并没有因为与诺贝尔奖无缘而发怨言，相反地，她却站起来为她的老师休伊什教授讲公道话。天文学家们并没有因为贝尔博士的谦虚而忘怀她的卓越贡献。1980 年在波恩召开的国际天文学会第 95 次会议是世界脉冲星学者的大聚会，共同回顾脉冲星发现 13 年来的巨大进展，会议特别把贝尔女士请来。在会议论文集的第一页上登载了贝尔博士和休伊什教授在会议期间的合影（见图 9-7），并冠以“脉冲星发现者的再次会见——乔斯林·贝尔博士和休伊什教授”的文字说明。这代表了当代脉冲星学者的心声，他们把脉冲星发现者的桂冠戴在贝尔博士的头上，弥补那不能更改的遗憾。

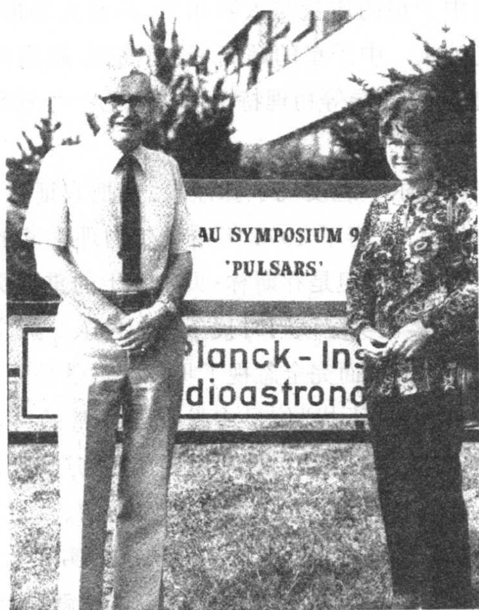


图 9-7　贝尔博士和休伊什教授在脉冲星国际会议上的合影

三、射电脉冲双星的发现

恒星世界中的双星系统很平常,已知的恒星有近一半属于双星系统,双星系统可谓千千万万。即使对中子星来说,所有伴有 X 射线辐射的中子星都是双星系统的成员,也是司空见惯。但是,从 1967 年首次发现脉冲星到 1974 年的 7 年间所发现的 100 颗脉冲星都是单星。人们并没有刻意去发现射电脉冲双星,然而却在一次高灵敏度的巡天观测中意外地发现了。这第一个双星系统非同小可,它成为验证引力辐射的空间实验室,经过近 20 年坚持不懈的努力,证实了引力波的存在,开辟了引力波天文学的新领域。发现者赫尔斯和泰勒获得了 1993 年的诺贝尔物理学奖。

1. 令人牵肠挂肚的引力波检测

爱因斯坦是20世纪最伟大的科学家，他的广义相对论原理被称为20世纪理论物理学研究的巅峰。自1916年爱因斯坦在他的广义相对论中预言宇宙空间中可能有引力场及引力波存在以来半个多世纪，在地球上的实验室中建造了许多探测宇宙引力波的仪器装置，可都没有捕捉到过引力波的可靠信号。

任何具有质量的物体作加速运动都会产生引力波。但是，地球上的物体的质量太小，所能产生的引力波极其微小，几乎是不可能测量到。单个恒星的质量比较大，但它们所能获得的加速度不可能太大，也不能有明显的引力波。双星系统中两颗恒星相互绕转，如果轨道椭率很大，子星既有很大的质量，又能有很大的加速度，它们产生的引力波就比较大了。还有，像超新星爆发等剧烈过程中物质的急剧坍缩和爆发式抛射也会有较强的引力波发生。物理学家和天文学家都期望能探测到来自宇宙空间的引力波。引力波具有非常强的穿透性，传播中几乎不受阻尼。但是，太阳系外的天体离我们都非常遥远，即使天体辐射的引力波很强，到达地球的流量又变得微乎其微了。因此要研制非常灵敏的引力波接收器。

引力波可以引起物体发生扭曲和变形，因此所有引力波天线常常是一根棒，借助测量这个天线极小的扭曲和变形来确定是否接收到引力波。目前最先进的装置是利用激光干涉方法测量两支互相垂直的“量尺”之间的长度差及其变化。当然量尺越长越容易测量，因此探测引力波的装置的量尺越做越长，如4千米(美国)、3千米(意大利)、600米(德国)和300米(日本)等。测量微小变化的灵敏度已经达到$10^{-18}\sim10^{-20}$。为了避免干扰，正在设法把引力波探测器放到太空中去。

一个新理论需要时间来验证它的正确性。然而，引力波理论的验证等待了半个多世纪！直到1974年，J. 泰勒和赫尔斯发现射电脉冲双星才为引力波探测研究带来重大转机。

2. 年轻气盛的J.泰勒



图9-8 1993年诺贝尔物理学奖获得者之一J.泰勒

在1967年当休伊什教授和贝尔博士发现脉冲星的时候，J.泰勒还是一位博士研究生。1968年获得博士学位后，他就和哈佛大学的同事一起提出了一个利用美国国立射电天文台的92米射电望远镜进行脉冲星观测研究的计划，很快就取得成功，继休伊什等发现的首批4颗脉冲星后，发现了第五颗射电脉冲星。泰勒刚刚进入天文学研究岗位就立志要站在脉冲星观测研究的最前沿，做前人没有做过的或前人不能做的课题。

休伊什应用的射电望远镜在作出发现脉冲星的历史性贡献以后就让位于其它大型射电望远镜。休伊什的这台望远镜仅能在3.7米波段进行观测，也不能转动和跟踪，有很大的局限性。当时英国焦德尔班克的口径76米的射电望远镜，澳大利亚帕克斯的64米射电望远镜搜寻脉冲星的能力大大地超过剑桥大学的射电望远镜。世界上口径最大的美国阿雷西博305米射电望远镜在当时灵敏度为最高，对搜寻比较弱的脉冲星是最强有力的。

泰勒积极筹划一个技术先进的脉冲星巡天计划。为了搜寻周期更短、距离更远、流量更弱的脉冲星，他选定了阿雷西博这个世界最大的天线。但是，光有大天线还不够，为了克服星际介质色散的影响，还必须研制有消色散能力的接收机。

由于星际介质色散的影响，不同频率的射电波的传播速度不同，高频的信号传播得比低频的快。这好比在运动场上进行百米或万米比赛，在出发时不同频率的信号是在同一个起跑线上，但到达终点时就前后参差不齐了。比赛的路程越长，彼此的差距越大。这样一来，同时出发的

一个脉冲，到达望远镜时就被展宽了，甚至被平滑掉。脉冲星发出的射电脉冲包括了很宽的频率范围，射电望远镜只能截取其中的一段。所截取的频带越宽，所收到的能量就越多。因此我们总是希望接收机的频带宽度越宽越好。

泰勒研制消色散接收机解决了这个困难。接收机由多个频率通道组成，为了不使脉冲展宽，让单个通道的频带尽量地窄，只有 250 kHz，为了提高灵敏度，用 32 个窄带系统组成接收机。这 32 个通道的中心频率依次降低，每个通道的频带一个挨着一个，总共覆盖 8 MHz 的频带宽度。由于各个通道的频率不同导致的时间延迟，则在资料处理时加以修正。消色散接收系统也带来很大的困难，就是观测数据量增加了 32 倍，使资料处理量剧增。在那个时代，电子计算机还不发达，应用更不普遍。他们应用当时最先进的电子计算机技术成功地解决了这个难题。

泰勒没有把巡天观测的目标锁定为发现脉冲双星系统，但他已意识到发现脉冲星双星系统的意义，在申请购置计算机的报告中明确写道："即使我们只发现一个脉冲星双星系统，也将是十分有意义的，因为至少可以由此估计出脉冲星的质量。"

这是一次在当时而言灵敏度最高的脉冲星巡天，期望有所发现决不过分，但是泰勒做梦也没有想到，这次巡天发现了脉冲双星，并导致他们荣获诺贝尔物理学奖。

3．赫尔斯发现脉冲双星

1973 年在麻省大学学习的赫尔斯是泰勒教授的研究生。他以极大的兴趣和热情，把泰勒教授提出的脉冲星巡天计划当作博士论文。他毫不犹豫地接受了这个极富挑战性的博士论文题目是因为这个课题体现了射电天文学、物理学和电子计算机科学三个学科完美的结合。



图 9-9　1993 年诺贝尔物理学奖获得者之一赫尔斯

巡天观测是要发现新脉冲星，其位置、周期、色散量，还有脉冲宽度均是未知数。需要在所巡查的天区一小块一小块地观测自不待言，在430兆赫频率上，阿雷西博射电望远镜的方向性很强，主瓣是一个很窄的铅笔束，一次观测只能覆盖0.06平方度的天区。计划中要对140平方度进行巡查，这样要观测2000多次。在处理资料时，对其它几个未知参量要一点一点地试探。整个140平方度的观测将有10亿个数据。采用电子计算机成为泰勒和赫尔斯获得成功的关键，也推动了脉冲星观测研究的发展。

赫尔斯以惊人的毅力和工作热情顺利完成了140平方度天区的观测和资料处理。这个天区以前也有人巡查过，曾发现了10颗脉冲星，而他们这次巡天却又发现40颗新脉冲星，可以说取得了空前的好成果。这次巡天的成功率比以前的高出4倍。在当时所知道的脉冲星仅有100颗的情况下，一下子增加了40颗，对脉冲星的观测研究有巨大的促进。而由于发现第一个脉冲双星系统，更使这一次巡天观测成果身价百倍。

在新发现的40颗脉冲星中，有一个周期仅0.059秒的脉冲星PSR1913+16很“怪癖”，严重地困扰着赫尔斯。已知的脉冲星都具有准确的周期性，它们的周期虽有系统的变化，但很小，仅在10^{-12}秒/秒至10^{-20}秒/秒之间，几天之内很难察觉出周期变化。但是，赫尔斯几天内的测量却发现这颗脉冲星的周期反复无常，这是前人没有观测到过的现象。赫尔斯当时感到极度的烦恼和困惑。他在不停地思考着：“究竟什么地方出了错？”。他决心要把这里面的原因弄个水落石出，无论如何要把这颗脉冲星的准确周期测出来。

赫尔斯当时猜想，可能是观测系统的某一环节出了问题，也可能是资料分析方法不当。当时认为第一个原因可能出在接收机采样时间上，10毫秒的采样时间对这颗短周期脉冲星可能是太长了。为此，改用1毫秒采样时间重新进行观测。原来以为一切将会烟消云散，而得到的观测结果却是疑云更重，周期还是变化不定。在反反复复审查观测资料的过程中终于查出了一些征兆，悟出了其中的奥妙：脉冲周期规则地变化是否源于双星的轨道运动？他没有立刻向他的导师报告这一想法，而是要

作更多、更严格的求证，直到确定无疑后才写信和打电报给他的导师泰勒教授，报告发现了一个轨道周期大约为 8 小时的脉冲双星系统的惊人消息。

这个脉冲星双星系统是双中子星系统，伴星也是中子星，但没有接收到脉冲辐射。这可能是因为其辐射锥没有扫过地球所致，图 9-10 为脉冲星双星系统的示意图。

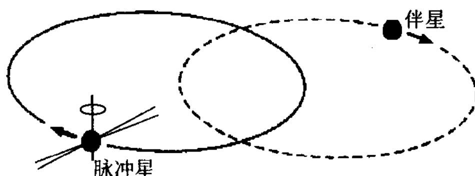


图 9-10　射电脉冲双星示意图

原来，在双星系统中的脉冲星有一半时间离地球越来越远，观测到的周期就会越来越长，而在另一半时间里脉冲星的运动是越来越靠近地球，观测到的周期应是越来越短的。这导致周期比较大的变化。

4. 20 年心血浇灌出来的诺贝尔奖

赫尔斯和 J. 泰勒发现的脉冲星双星，不是一般的脉冲双星。目前已发现近百个脉冲双星，但仅发现 2 个这样的脉冲双星系统。首次发现就“碰上”了最好的一个。这是难得的机遇，然而这个机遇只能属于在脉冲星巡天观测中辛勤耕耘并决心攀登科学高峰的人们。

泰勒教授意识到 PSR1913 + 16 双星系统的发现将可能解开引力波这个谜。他于是全力投入到引力波验证的研究中，20 多年坚持不懈。这个特殊的脉冲双星系统的重要性在于它是双中子星系统，两颗子星间没有物质交流。它的轨道周期很短，仅 7.75 小时，两颗子星相距很近，轨道椭率很大，达到 0.617。这导致脉冲星具有非常高的轨道运动速度，可达光速的十分之一。根据广义相对论理论推算，这个双星系统的引力辐射十分强。引力辐射将导致双星系统轨道周期的明显变化，计算出这个双星轨道周期的变化率为 -2.6×10^{-12}秒/秒。在观测上要测出轨道周

期如此小的变化，脉冲到达时间的测量必须极端地精密。1974 年以后，J. 泰勒教授和他的同事们一直追求这一目标，不断地改进测量方法，提高观测的精度。1974 年的测量精度为 300 微秒，到了 1981 年就达到了 15 微秒，精度提高了 20 倍。为了发现轨道周期的变化必须进行长期的观测。为此，泰勒教授奋斗了近 20 年。在 1978 年 11 月测得轨道周期的变化率为 -3.2×10^{-12}秒/秒，与理论值约差 20%，但是他们仍然不满意这个结果。这种观测一直持续到获得诺贝尔物理学奖的 1993 年，经过近 20 年坚持不懈的努力，利用世界上最大的阿雷西博射电望远镜进行上千次的观测，观测精度进一步提高，最后观测值和广义相对论理论预期值的误差仅为 0.4%(图 9-11)。终于以无可争辩的观测事实，证实了引力波的存在，诺贝尔物理学奖属于他们不是意外，而是众望所归。

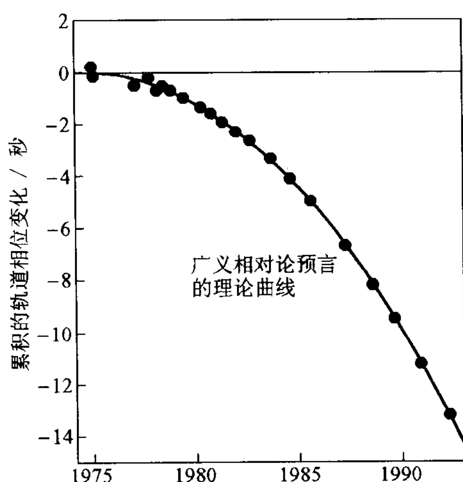


图 9-11 射电脉冲双星 PSR1913+16 的轨道周期变化和引力波的验证

四、毫秒脉冲星

1982 年贝克教授和库尔卡尼博士发现的毫秒脉冲星 PSR1937+214 再一次轰动了全世界。新发现的毫秒脉冲星周期最短，只有 1.6 毫秒，

每秒自转600次！成为宇宙中的旋转冠军。毫秒脉冲星行星系统的发现开创了寻找太阳系之外行星系统的先河。毫秒脉冲星大量存在于球状星团中，成为研究球状星团的探针。

1. 又一次出乎意料的发现

到1982年已经发现约300颗脉冲星，这个数目与理论估计的几万颗相距甚远。发现更多的脉冲星仍是天文学家的兴奋点。虽然毫秒脉冲星的发现是天文学家有计划、有目标的观测研究结果，但其中神秘色彩仍然非常浓郁。

到1977年，人们已对脉冲星的特性有了深入的了解。脉冲星的强磁场导致其辐射具有很强偏振，非热的辐射机制决定了其频谱属于幂律谱，也就是辐射强度随频率的增加而迅速地减小。还有一个明摆着的特性就是致密的射电源。这些特点给搜寻脉冲星指明了一种新的方法。那时，剑桥大学射电源星表中有一个名叫4C21.53的射电源引起人们的关注。它就具有强偏振、幂律谱、致密的特性。经过几年的探索，确认在它的附近有一个名叫1937+215的射电源。人们相信它就是一颗脉冲星。它处在泰勒和赫尔斯1974年巡天的天区中，然而多次巡天并没有发现这个脉冲星。因为以前的巡天对周期小于10毫秒的脉冲星是不敏感的。1982年，好几个国家的脉冲星研究小组对这个射电源进行反复的观测，其中脉冲星的发现者休伊什教授也在其中，但都无功而返，一无所获。其主要原因是没有人估计到脉冲星的自转周期可能短至毫秒级。本来，调整接收机的时间常数是很容易做的事，举手之劳的事大家都没有去做，把机遇留给了美国的贝克教授和他的合作者。

贝克他们坚信，在这个射电源中隐藏着一颗快速自转的脉冲星。他们用世界上最大口径的阿雷西博射电望远镜和新研制的消色散能力很强的接收机，在观测时不断地调整接收机的时间常数，终于在1982年9月末获得成功。观测证认了1.588毫秒的周期性的存在。周期最短的毫秒脉冲星终于发现了。这颗中子星每秒钟要自转600多圈，成为宇宙空间转得最快的恒星。

2. 新的一类脉冲星

这是一颗不同寻常的脉冲星,冲破了已有的脉冲星观测结果和理论的框架。从300颗脉冲星的研究得知,短周期脉冲星都是年轻、强磁场的中子星,它们的周期变化率都比较大。如蟹状星云脉冲星的周期为33毫秒,属最短,它的年龄约1000年,是最年轻的脉冲星,也是磁场最强的脉冲星。而毫秒脉冲星PSR1937+21却反其道而行之,它的周期比蟹状星云脉冲星要短20倍,但年龄反而要高出5个数量级。它的磁场和周期变化率分别比蟹状星云脉冲星低4个数量级和6个数量级。总之,不能用已有的脉冲星理论来解释这颗毫秒脉冲星的特性。可以断定它不可能是由正常的脉冲星演化而来的,毫秒脉冲星是一种新的类型的脉冲星。

毫秒脉冲星是怎么演化来的呢?它们的自转为什么会如此之快?年龄为什么如此之老,磁场又如此之弱?一系列难题摆在天文学家的面前。天文学家在X射线脉冲双星的研究中找到了答案。

1979年以来陆续发现了X射线脉冲双星系统。最有名的是半人马座X-3和武仙座X-1两个X射线脉冲双星。脉冲周期分别为4.84秒和1.24秒,正好在射电脉冲星的范围。很自然,它们也被确认为中子星。它们的周期呈现出不断变短的趋势,与射电脉冲星的情况正好相反。X射线双星中中子星自转加速的事实及其理论解释对研究毫秒脉冲星有极大的启发。X射线双星中的中子星是由于不断吸积伴星物质而自转加快的,毫秒脉冲星之所以自转如此之快,很可能也是这样的机制。在它们的演化历史上必然经历了X射线脉冲双星自转加速阶段。在它的伴星演化到超新星以后,中子星因为不能得到伴星的物质而停止X射线辐射,后来就演变为辐射射电脉冲的毫秒脉冲星。在漫长的演化过程中,自转变得很快了,但年龄变老了,磁场也衰减了。

X射线脉冲双星如图9-12所示,由中子星和一个红巨星组成。红巨星由主序星演化而来,其体积不断膨胀,充满洛希瓣,然后红巨星的物质源源不断地输送到中子星。伴星的物质落到中子星磁极表面的过程中,

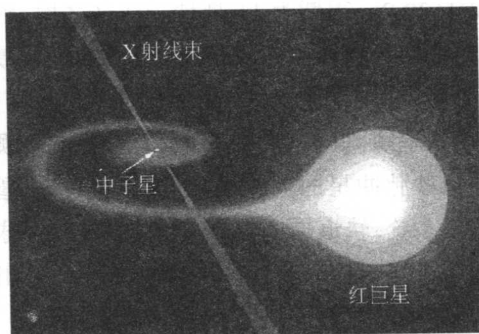


图 9-12　X 射线脉冲双星示意图

其势能转化为巨大的动能,使之温度升高,发射 X 射线。因为辐射区局限在磁极附近形成辐射锥,因此 X 射线望远镜观测到的是脉冲形式。

3. 毫秒脉冲星与球状星团

在 1982 年发现毫秒脉冲星之后,在国际上掀起了旨在发现毫秒脉冲星的巡天的狂潮。相继有 8 次重要的巡天,几乎覆盖了整个天区,但收获不大。特别令人伤心的是,澳大利亚帕克斯的 64 米射电望远镜进行巡天覆盖了大部分南天天区,美国格林班克的 43 米直径射电望远镜巡天和英国剑桥的 80 兆赫的天线阵巡天,覆盖几乎整个北天天区,但是这几次巡天连一颗毫秒脉冲星也没有发现。全世界一系列大规模的巡天观测,仅仅发现了 7 颗毫秒脉冲星,与预想的结果差得太远。脉冲星学者和专家不得不认为:毫秒脉冲星是罕见的脉冲星。毫秒脉冲星真是如此的罕见吗?

由毫秒脉冲星是 X 射线双星系统演化而来的判断使天文学家想起了球状星团。球状星团的形状近似为球形,是由大量恒星组成的集团,少的有几千颗,多的达几十万颗恒星。已经知道在球状星团中 X 射线双星的数目比较多,那么在球状星团中是否有比较多的毫秒脉冲星呢? 英国焦德尔班克射电天文台的莱因教授首先作了尝试。1987 年,他们把射电望远镜对准球状星团 M28 中的具有幂律谱和强偏振的射电源,结果发现了周期为 3 毫秒的脉冲星 PSR1821-24。几个月后,他又在球状星团

M4 中发现了 PSR1620-26，周期为 11 毫秒。在这之后，到球状星团去寻找宝贝的毫秒脉冲星成为脉冲星学者持续不断的追求，最为成功的例子是在球状星团杜鹃座 47 中发现 24 个毫秒脉冲星(见图 9-13)。这是一个离我们最近的球状星团，仅 4.1 kpc。因此比较容易观测到低光度毫秒脉冲星。这 24 个毫秒脉冲星的周期在 2.10 至 11.56 毫秒之间。其中至少有 13 个是双星系统，轨道周期在 0.07 至 191 天。球状星团成为毫秒脉冲星的乐园，反过来毫秒脉冲星又成为研究球状星团中心性质的探针。

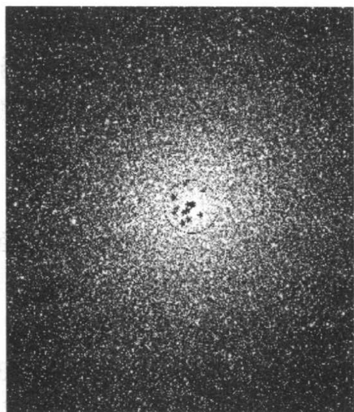


图 9-13　杜鹃座球状星团和它里面的毫秒脉冲星

4. 毫秒脉冲星行星系统

1982 年发现的毫秒脉冲星 PSR1937+214，使脉冲星的研究又开拓了更广阔的领域，再一次轰动了全世界。寻找太阳系之外的行星系统是人们梦寐以求的事。从理论上估计，银河系中上千亿颗恒星中约有 10% 有行星系统，其中有的还可能有智能生命。但是，要从观测上证实却是太困难了。

然而人们始料未及的是，此类观测研究最先成功的例子却属于射电脉冲星。1992 年 A. 沃斯赞和 D. A. 弗雷尔发现的毫秒脉冲星 PSR1257+12 有行星系统，成为人类发现的第一个太阳系外的行星系

统。这颗脉冲星的一颗行星离脉冲星大约 5400 万千米，公转周期为 66.6 天，另一颗行星离开脉冲星大约 7000 万千米，公转周期为 98.2 天。它们的质量分别为 3.4 和 2.8 个地球质量。

由超新星爆发而来的正常脉冲星不可能具有原来存在的行星，因为任何原有的行星都会在爆发时连同恒星外层一起炸掉。毫秒脉冲星常常是双星系统，它的辐射很强又伴随着高能粒子流，可以剥蚀掉伴星的物质，使伴星越来越小逐渐地变为只有行星大小的残骸，形成第二代行星。

在 1990 年 2 月用 305 米阿雷西博射电望远镜在 430 MHz 频率上进行的毫秒脉冲星高银纬巡天中发现了脉冲星 PSR1257 + 12。进一步验证是在 1990 年 7 月 5 日进行，使用阿雷西博射电望远镜，在 430 MHz 和 1400 MHz 频率。总共有 4040 个脉冲到达时间资料被累加。到达时间是指脉冲信号到达天线的观测时间。中子星自转的不稳定导致周期非常小的不规则变化，称为周期噪声。行星系统的轨道运动会使脉冲星的周期产生非常小的"晃动"，如果这种"晃动"比周期噪声小，就不可能检测出来。由于毫秒脉冲星的自转非常稳定，周期噪声很小，因此只有毫秒脉冲星的行星系统才可能被检测出来。图 9-14 是脉冲星 PSR1257 + 12 的脉冲到达时间观测结果，在 1 年多的时间里，周期发生微小的变化，变化幅度在纳秒(10^{-9}秒)的量级。假定这种微小的周期变化是由这颗毫秒脉冲星的行星系统运动所引起的，由理论拟合(实线)获得 2 个行星的多个参数。

毫秒脉冲星周期的高度稳定性在宇宙天体中是绝无仅有的，因而在广泛的领域中有着特殊的研究意义。图 9-15 给出几颗毫秒脉冲星周期噪声的长期监测结果。一些毫秒脉冲星的周期的长期稳定性达到 10^{-14}～10^{-15}，已经与原子钟的稳定度相当。天文学家正在研究由多颗处在不同方向的周期噪声最小的毫秒脉冲星组成一个"脉冲星钟"，以作为原子钟的一种补充。

理论预言了宇宙初始背景引力波的存在，其频率特别低，也极其微弱，仍然没有探测到。毫秒脉冲星提供了一种探测方法，由于宇宙背景

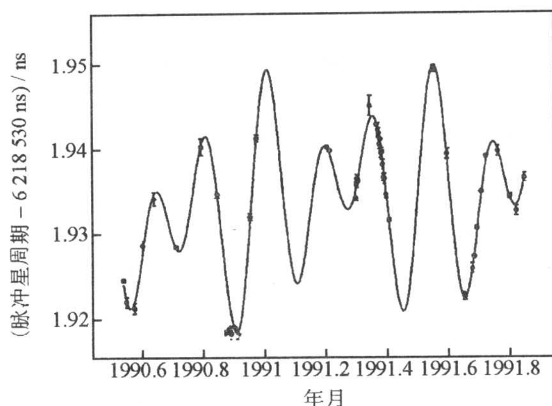


图 9-14　脉冲星 PSR1257 + 12 的周期变化(图中点),假设有 2 个行星系统模型所预期的周期变化(图中实线)

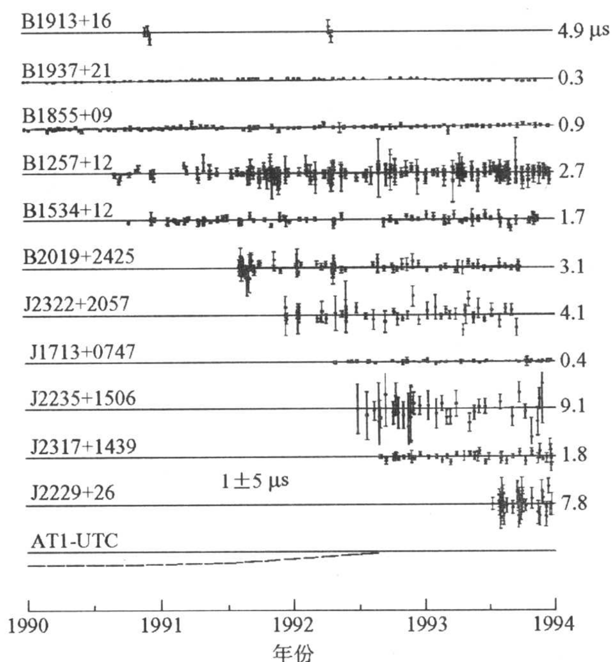


图 9-15　毫秒脉冲星周期噪声的长期变化

低频引力波在通过毫秒脉冲星时将会对它的脉冲到达时间产生扰动，精确的脉冲到达时间测量可以发现这种扰动，从而判断宇宙背景低频引力波的存在。

5. 射电脉冲双星系统和新的追求

1974年发现第一个脉冲星双星系统以后，搜寻射电脉冲双星的努力倍增，但发现的却很少。到了1982年发现毫秒脉冲星后，发现的双星的数量急剧增加，到目前已有近百个射电脉冲双星系统。

大多数射电脉冲双星是一个中子星和一个白矮星组成的系统。1982年发现PSR0655+64双星是处于轨道椭率几乎为零的圆形轨道，轨道周期和地球自转周期差不多，为1.03天，中子星的自转周期为196毫秒，伴星是质量为0.4～0.9个太阳质量的白矮星。

双中子星系统不多，仅有6例。1991年发现的PSR1534+12是一个椭率比较大的双中子星系统。其轨道周期为10.1小时，轨道椭率为0.27，脉冲很窄，信号很强，有利于提高测量精度。这又是一个检验广义相对论引力辐射的理想对象。

1991年发现的具有大质量伴星的脉冲双星PSR1259-63是一个特殊的品种。因为其中的伴星既不是中子星，也不是白矮星，而是一颗质量大于12个太阳质量的光学星。射电脉冲周期为47.7毫秒，轨道周期为3.5年，轨道椭率特别大，达到0.87。

2003年，天文学家盼望已久的双脉冲星系统终于被发现。在这之前，已经发现5个双中子星系统，一颗是脉冲星，另一颗确认为中子星，但在射电波段观测不到，更没有射电脉冲。一般认为，这颗伴星的射电辐射束没有扫过地球，因而不能被观测到。2003年4月，应用澳大利亚帕克斯的64米口径射电望远镜的多波束巡天观测发现了PSRJ0737A，其周期为22毫秒。很快就发现它是双星系统的一个成员，轨道周期很短，仅2.4小时，轨道速度非常快，达到了光速的0.1，因而可以确定其轨道椭率比较大。其伴星的质量为1.25个太阳质量，意味着是一个双中子星系统。天文学家又找到了一个比Hulse-Taylor双中子星系统更好地

验证引力辐射的双星系统。天文学家和物理学家还没有来得及庆贺这一重要发现,这一年的10月份又传来好消息,发现PSRJ0737A的伴星也是一颗脉冲星,取名PSRJ0737B。它是一颗比较年轻的正常脉冲星,周期为2.77秒,磁场为10^8特,一个正常脉冲星和一颗毫秒脉冲星组成双星系统,正与毫秒脉冲星形成的理论相符。由于正常脉冲星的辐射受到轨道运动的影响,在2.4小时的轨道周期中仅仅有两段约10分钟可以接收到它的辐射。双射电脉冲星系统的发现带来一系列的待研究的课题,其中最令人兴奋的还是引力波的探测。物理学家为了探测引力波一直在努力奋斗,近些年来研制的大型引力波探测器LIGO和VIRGO的重要观测目标之一就是中子星并合时发射的引力波。按照Hulse-Taylor双星系统PSR1913+16的数据估计,约100年能观测到一次双中子星并合事件,这要求科学家们守候100年。按新发现的双脉冲星系统的参数估计,双中子星的并合事件在几年中就可能发生一次。双脉冲星PSRJ0737A和B的发现被美国《科学》期刊评为2004年十大科技突破之一。

这些品种繁多的射电脉冲双星系统为研究恒星的演化提供了丰富的资料,但是天文学家最感兴趣的伴星为黑洞的射电脉冲双星系统还没有发现,世界各国都在紧张地进行搜索,一旦发现将又会引起轰动。

思考和复习题:

1. 简述普通脉冲星和毫秒脉冲星的观测特性。
2. 为什么说脉冲星就是中子星?
3. 利用磁通量守恒原理,解释中子星具有特别强磁场的原因。
4. 从脉冲星的发现和认证过程谈休伊什和贝尔的贡献,你对贝尔女士未获诺贝尔物理学奖的事有什么评价?
5. 简述泰勒和赫尔斯发现脉冲双星和引力波的验证过程。说明他们为什么能荣获诺贝尔物理学奖?

第十讲

黑洞和类星体

黑洞和类星体是两种不同性质的天体，但它们都是对宇宙演化有举足轻重地位的天体。黑洞是理论研究的产物，可以说是理论家计算出来的。黑洞作为大质量恒星演化的归宿，一般是属于恒星层次的天体，但是也有星系层次的黑洞。当今的黑洞研究已越来越多地与天体物理前沿领域众多的热点课题相关联，已经到了采用各种观测手段搜寻黑洞的阶段。黑洞研究的兴起源于爱因斯坦的广义相对论，而霍金把量子理论引入到黑洞研究中导致观念上的重大突破，黑洞的边界不再是密不可透，黑洞还能辐射能量和损失质量。

类星体是迄今为止观测到的最明亮、最遥远、最古老的天体。类星体并不是恒星，而可能是遥远星系的核心部分。它的能量来源、特大红移和“超光速”现象成为当代物理学和宇宙论争论的焦点。

黑洞和类星体的重要性绝不亚于白矮星和中子星。虽然黑洞理论已很详尽，但是目前尚未找到黑洞存在的确切证据，类星体虽已发现过几万，但它究竟是什么天体也还没有完全弄清楚，所以仍然是宇宙中两种尚未彻底揭开其奥秘的天体。

一、黑洞概念的提出

基于光速有限和牛顿力学的逃逸速度这两个原理，早在200年前就有人预言黑洞的存在。但是，只有爱因斯坦的广义相对论才能给黑洞以正确的解释，黑洞是引力坍缩的一种结果。

1. 第二宇宙速度与黑洞

早在200多年以前的1795年，著名的天文学家拉普拉斯根据牛顿的引力理论曾经预言了黑洞的存在。他说："一个密度和地球一样而直径为太阳的250倍的发光恒星，由于引力的作用，它将不允许任何光线离开它。由于这个原因，宇宙中最大的发光天体也不能被我们看见。"他称这种天体为"黑暗的一团"。拉普拉斯不仅超前一个多世纪预言光能被引力捕获，他还猜测巨大的黑暗天体可能和恒星一样多。宇宙总质量的相当大的一部分很可能是看不见的。实际上，1783年英国牧师、地质学家约翰·米歇尔还早于拉普拉斯提出几乎一样的看法，只是名气不大，被人们忽略了。

生活在地球上的人们都会体验到地球引力的存在。我们向上抛出的石头会很快落回地面。速度很快的炮弹也要落回地面。但是，我们知道人造卫星可以绕地球飞行不掉下来，阿波罗宇宙飞船能克服地球的引力登上月球，有些宇宙飞船甚至还逃离了太阳系。这一切都由物体的速度来决定。在中学课本中就已讲述过的"宇宙速度"对我们理解黑洞的概念是有帮助的。我们知道，如果物体的运动速度达到7.9千米/秒，它就可以挣脱地球的吸引力环绕地球飞行，而不再落到地面上，通常人们把这个速度叫做第一宇宙速度；如果达到11.2千米/秒，就可以飞出地球而环绕太阳飞行，叫做第二宇宙速度；如果达到16.6千米/秒，就可以逃脱太阳的引力飞出太阳系，叫做第三宇宙速度。

根据牛顿力学原理，一艘宇宙飞船摆脱地球引力的控制到太空去的条件是它的动能（$mv^2/2$）要大于它在地球表面处的引力势能

(GMm/R)。这个逃逸速度也就是第二宇宙速度，表示为

$$v > \sqrt{2GM/R},$$

其中 G 为引力常数，M 和 R 为地球的质量和半径，v 为飞船或火箭的速度。计算可知，逃逸速度为 11.2 千米/秒。逃逸速度与被发射的飞船的质量无关，只由天体的质量和半径的比值决定。恒星质量越大，体积越小，逃逸速度亦越高。根据爱因斯坦狭义相对论，任何物体的速度都不能超过光速。因此，假如有一个逃逸速度达到光速的天体，那么各种波长的电磁辐射及以光速运动的任何物质都不可能离开这个天体。这个天体所发出的光也就不可能逃离引力的魔掌，外面的观测者就不可能看见它，这颗恒星便成为黑洞。根据公式(1)可以计算得到，如果太阳的质量不变但半径压缩到 3 千米时，逃逸速度就大于光速。地球半径压缩到只有 0.9 厘米时，逃逸速度也可超过光速。

把上面的公式进行改写，用密度来表示，因为密度 $\rho = M/V$，$V = (4/3)\pi R^3$，其中 V 为体积。这样就变为

$$v > \sqrt{8\pi G\rho R^2/3}\ 。$$

由这公式可以很好理解拉普拉斯提出的关于黑洞的概念，在密度一定时，逃逸速度与恒星的半径成正比。

2. 广义相对论关于黑洞的概念

虽然从牛顿力学出发提出了黑洞的概念，但只有爱因斯坦的广义相对论才给黑洞以正确的解释。在广义相对论里没有逃逸速度这个概念。

根据广义相对论，引力场将使时空弯曲。质量一定的恒星，当体积很大时，它的引力场对时空几乎没什么影响，从恒星表面上某一点发出的光可以朝任何方向沿直线射出。而当恒星的半径变得很小时，它对周围的时空弯曲作用就变得很大，而且半径越小，作用越大，半径小到一定程度后，朝某些角度发出的光就将沿弯曲空间返回恒星表面。这和牛顿力学的概念完全不一样。牛顿力学认为月球绕地球运转是因为月球受到地球引力的吸引，但广义相对论则认为是地球的质量扭曲了附近的时空，月球在不平坦的时空以最自然的方式运行，走出了一条绕地球运转

的曲线。就如火车沿铁轨运行一样，当铁轨变弯曲后，火车自然沿弯曲的铁轨运行。

1915 年爱因斯坦发表广义相对论，一个月后，德国物理学家卡尔·史瓦西就得到了真空条件下球状物体周围引力场的精确解。史瓦西解适用于任何恒星，因为它只需质量这一个参数。史瓦西解的一个重要的结论是在临界距离，即史瓦西引力半径处时空出现奇异行为，就连垂直于表面发射的光都被捕获了。史瓦西半径的表达式为

$$R_S = 2GM/c^2,$$

公式中的 M 是黑洞的质量，G 是引力常数，c 是光速。可以算出，太阳的史瓦西半径为 3 千米，地球的史瓦西半径仅为 0.9 厘米。这和由牛顿力学推导出的公式所给出的估计是一致的。这就是最简单的黑洞，它不旋转；不带电。称为史瓦西黑洞或球形黑洞。

早在 1939 年奥本海默等人根据广义相对论导出了黑洞的图像。在很长的一段时间里，黑洞的假说并未引起多少天文学家的注意。只是到了 20 世纪 60 年代，由于类星体、X 射线源、脉冲星等一系列高能天体的发现，才使人们重新考虑和评定黑洞在天体物理中的价值。在那时，美国天文学家约翰·惠勒创造了黑洞这个术语。今天，黑洞学说已渗透到晚期恒星、星系核、类星体及宇宙学等很多方面，成为目前天体物理领域中最活跃、争论也最多的课题之一。有关黑洞的理论及观测证认工作，近年来已获得很大的进展。

3. 大质量恒星的归宿

我们知道白矮星存在一个质量上限——钱德拉塞卡质量上限，凡是质量超过 1.4 个太阳质量的白矮星都是不稳定的，这时电子简并压力不能抵抗引力，必然会进一步坍缩为中子星。中子星也存在一个质量上限——奥本海默极限。这个上限约为 3 个太阳质量。在超新星爆发后，如果恒星剩余的质量超过 3 个太阳质量，中子气简并压力也无法抗衡向内的引力，这时在已知的物理理论中，再也没有更强的力能足以与引力相对抗，恒星只能一直收缩下去，形成黑洞。

二、黑洞的性质和类型

黑洞是一种特殊的天体，具有与我们熟知的天体很不一样的特性。黑洞的特性很简单，只有质量、电荷和角动量三个参数。根据黑洞质量来区分，有恒星级质量黑洞和星系级质量黑洞；按有无旋转来分，有不旋转的史瓦西黑洞和旋转的克尔黑洞。

1. 黑洞的性质

黑洞具有许多奇异的特性。它有一个边界，被称为“视界”。球状黑洞的视界就是以史瓦西引力半径为径向坐标的球面。视界外面的任何物体或可以朝向或离开视界而运动，也可以绕着黑洞做轨道运动。但是，物质(包括光)一旦落入视界之内，就再也不能逃出视界(见图 10-1)。我们接收不到黑洞视界里面的任何信息。黑洞是黑的，是看不见的。在黑洞视界以内，物体受巨大引力以极快的速度落到黑洞中心。除中心有物质外，其它地方完全是空无一物，中心点称为奇点。如图 10-2 所示。普遍来说，黑洞是只有质量、电荷和角动量的暗黑而空虚的球体。这是一个很难理解的奇怪天体。

按照广义相对论推出的黑洞，在其中心的那个几何点，物质密度、引力和起潮力都是无穷大。这就是所谓“中心奇点”的状态。在中心奇点

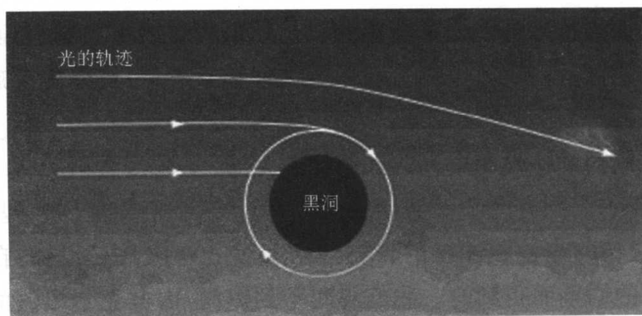


图 10-1　黑洞对外界光线的影响

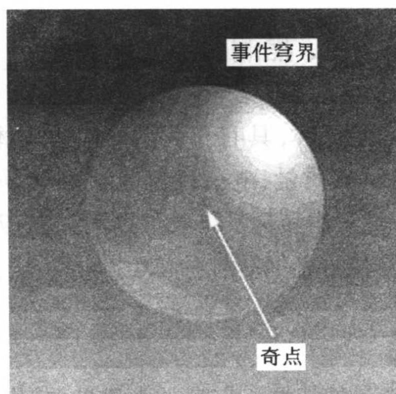


图 10-2 史瓦西黑洞的视界和奇点

附近,一切物理定律根本不适用了,广义相对论也不再正确了。

就黑洞性质来分,主要有史瓦西提出的球状黑洞、克尔提出的旋转黑洞和霍金提出的量子黑洞。还有一种黑洞是带有电荷的,是史瓦西黑洞的一种推广。电荷并不是分布在视界上,也不会改变黑洞视界的形状。史瓦西黑洞是最简单的黑洞,已在第一节介绍。下面仅介绍克尔的旋转黑洞、特大质量黑洞和霍金的量子黑洞。

2. 克尔旋转黑洞

所有恒星都在自转,没有理由认为黑洞没有自转。自转将造成黑洞偏离球形而成椭球体。史瓦西黑洞只是球形物体的引力场,与真实的恒星坍缩为黑洞的情况有偏离。新西兰物理学家罗伊·克尔得到旋转黑洞的引力场的解。

旋转黑洞的特性和史瓦西黑洞很不相同,史瓦西黑洞只有一个质量参量,而克尔黑洞有两个参量:质量和角动量。我们知道,中子星的自转非常快,最快的毫秒脉冲星的自转达到每秒 600 次,中子星的自转是根据观测到的周期而得到的。我们观测不到黑洞,因此克尔黑洞的自转究竟有多快? 我们无法测量。但是,按照角动量守恒的原理,大质量恒星坍缩为直径小于中子星的黑洞,黑洞的自转角速度必然会超过中子星。

像中子星一样，克尔黑洞的自转也是刚性的，视界上的所有点都以同样的角速度转动。

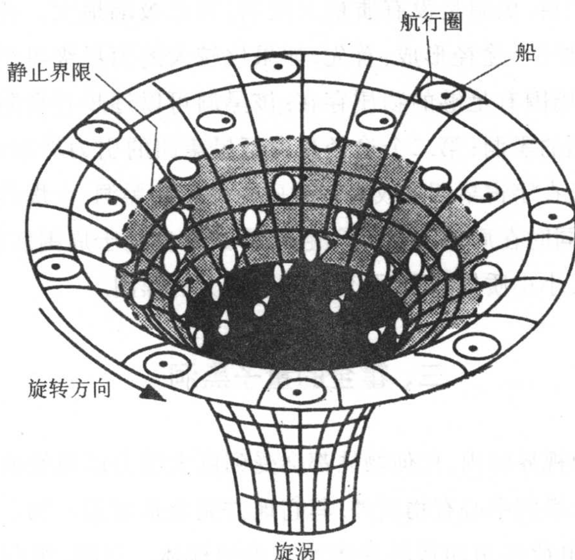


图 10-3　克尔黑洞大旋涡

旋动黑洞的周围就像宇宙中的一个引力大旋涡，旋涡中心是黑洞，在旋涡附近的物体都会吸向旋涡中心（图 10-3）。史瓦西黑洞只有一个视界，而旋转黑洞有两个视界：外视界和内视界。两个视界之间的区域称为能层，在能层内的物质会被黑洞的自转所带动，但仍有机会逃离黑洞的魔掌（图 10-4）。内视界才是真正的死亡线，一旦进入就永远别想逃脱。在外视界外面的物体，如飞船之类的物体可以自由飞行。

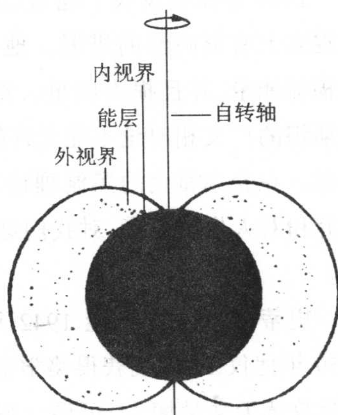


图 10-4　克尔黑洞的视界、静界和能层

3. 特大质量黑洞

从理论上讲，黑洞是没有质量上限的，可以极端地大。特大质量的黑洞可能经过三个途径形成：首先，如果比较大的恒星级黑洞(如 10 个太阳质量)的周围有足够的物质存在，该黑洞可以逐步吞食附近的物质而变成特大型的黑洞；第二个途径是由恒星集团的引力坍缩而形成；第三个途径则是在宇宙早期形成的特大质量的原初黑洞，大爆炸一方面引起宇宙膨胀，同时在局部区域引起凝聚，形成密度高于周围区域的团块，从而形成大大小小质量的黑洞，包括质量特大的黑洞。

三、霍金的量子黑洞

在黑洞的视界以内，任何物体都会受到巨大引力以极快的速度落到黑洞中心。除黑洞中心有物质外，其它地方完全是空无一物。黑洞是一个只有质量、电荷和角动量的黝黑而空虚的球体。然而，黑洞真的就是漆黑一团吗？

1974 年霍金发表了题为《黑洞会爆发吗?》的论文以后，黑洞理论才在观念上有突破性的进展。他证明，黑洞的边界不再是密不可透，黑洞能辐射能量，并且损失质量。霍金黑洞理论允许粒子逃离黑洞，这是爱因斯坦的广义相对论不能允许的，黑洞的“霍金辐射”被认为是划时代的贡献。在介绍霍金的黑洞理论之前，认识霍金这位传奇性人物的学习、研究和对人生的态度，对我们这些正在大学阶段的学生来说是大有益处的。

史蒂芬·威廉·霍金 1942 年诞生在英国著名的牛津大学所在地。1959 年他仅 17 岁就获得奖学金上了牛津大学物理学系。毕业后到剑桥大学攻读天文学博士，可谓一帆风顺。但是，在霍金成长的道路上突然出现了灾难性的变化。进入剑桥大学后不久，在他正当 21 岁青春年华，得了无方可医的帕金森氏病。医生估计他最多能活上 2～3 年。这突如



图 10-5　在轮椅上的史蒂芬·威廉·霍金

其来的打击,曾使他极度悲观,这种病使他不能像正常人那样生活,哪还谈得上攻读博士学位,攀登科学的高峰呢?在那时,正是天文学飞速发展的年代,天文学最耀眼的 20 世纪 60 年代四大发现(脉冲星、微波背景辐射、类星体、分子谱线)带动了现代天文学高速的发展,霍金这一病,很可能将使他被这一潮流所抛弃。

他选择了奋斗,虽然面临“早逝”的危险,时间不多了,更要坚强地活着。不仅活着,还要为实现自己的科学目标而奋斗。就在这个时候,他开始了天文学的研究。他的病情曾一度好转,能拄着双拐艰难地行走。但是,到 1970 年,病情迅速恶化,他就完全被禁锢在轮椅上,头也抬不起来。后来又失去了说话的能力,与同行交流只能用眉目的颤动来选择在拼字板上的一个个字母,以表达自己的想法。后来,借助早期不完善的电脑的帮助,用语音合成器说出一些话来。

然而,他研究的却是天文学中极其深奥的黑洞和宇宙论。这是一个理论性极强的分支学科,一个公式很可能要写满几页纸。但是,在他那枯竭的躯体里却有着一个出类拔萃的头脑和一颗不屈不挠的心。他用思考和记忆来推演公式,用头脑来做科学研究。霍金以重病之身克服人们无法体会的病痛折磨,奋力拼搏,取得了全世界瞩目的成就。医生说霍金天天在创造医学上的奇迹,而他却不断地创造天文学上的奇迹。他提出“霍金辐射理论”,把引力论、量子论和统计力学统一到一起,作出了

划时代的贡献。1978年荣获物理学领域的最高奖“爱因斯坦奖”。他因在黑洞和宇宙论方面的贡献，被誉为当今的爱因斯坦，成为当代最杰出的物理学家和天文学家之一。

霍金依照的仍然是广义相对论原理，所不同的是他考虑了量子论的影响。当考虑量子效应后，黑洞就不再是完全“黑”的了，黑洞的边界不再是密不可透。根据量子力学，空间中充满了成双结对的粒子和反粒子。在黑洞附近，如果一个粒子或反粒子掉到黑洞里面去，留下它的伴侣在黑洞外面，那么就相当于是黑洞发射的辐射。量子力学允许粒子逃离黑洞，这是广义相对论不能允许的事情。

与普通炽热物体一样，黑洞的辐射也表现为热谱形式。黑洞的热平衡温度是与它的表面引力成正比，与其质量成反比的。引力越大温度越高，质量越大则温度越低。大黑洞的温度低，小黑洞的温度高。如果黑洞的质量与太阳相当，其温度只有绝对温度[①] 的千万分之几度。在这样低的温度下，它辐射的热能是微不足道的，相当于一种蒸发过程，称为“霍金蒸发”。这种很少的“蒸发”很容易被宇宙背景辐射全部淹没。所以，大质量的黑洞仍旧是一种看不见的暗天体。小质量黑洞就不同了，如一个质量只有10亿吨的小黑洞会具有一千二百多亿度的高温。在这样的高温下，发射强度很大，类似一种爆发，它每秒放出的能量约有60亿焦耳，相当于6座巨型核电站所能输出的功率。

我们可以设想，如果我们能把物体的质量压缩到它的引力半径以内，它就可以自己经引力坍缩而变为小黑洞。这在原理上是成立的，但在技术上却是不可能做到的。霍金指出，在宇宙大爆炸发生之际，在温度极高和密度极大的条件下，就存在这样的可能。在介质高度受压的区域内，密度的局部涨落，就可能使其中一部分物质的体积小于其引力半径规定的范围。例如把10亿吨的质量压缩到相当于质子大小的空间，它就成为一个小黑洞了。很可能宇宙早期形成的这种小黑洞正在我们太阳系或银河系中回荡着，也许它们现在正在爆炸。

---

① 绝对温度(以 T 表示)与摄氏温度(t)的关系为：$T = t - 273.15$。

四、寻找黑洞

有人形容黑洞研究是理论家的天堂，观测家的地狱。黑洞的理论模型层出不穷，而观测资料却微乎其微。发现和确认黑洞的困难在于黑洞不发光，我们不可能直接观测到它的存在。但是，黑洞与其周围的物质之间的作用留下了它存在的蛛丝马迹，天文学家根据这样的线索搜寻黑洞的候选者，已经有了很大的进展。

1. 双星中黑洞的搜寻

黑洞虽然不会发光，我们无法观测，但是它与外部世界的联系并没有完全切断，黑洞可以通过引力场作用于其它物体上。受黑洞作用的体系有可能表现出一些新的特征，根据这些特征，我们就可以间接地寻找到黑洞。天文学家致力于在双星系统中发现黑洞就是这个缘故。黑洞这一名词的创造者惠勒曾形象地比喻说，“舞台上穿着黑色衣服的男孩拉着穿白色衣裙的女孩跳舞。当灯光变暗时，你只能看见这些女孩，而看不见男孩。女孩代表正常恒星，而男孩则代表黑洞。你看不到男孩，但女孩的环绕使你坚信，有种力量维持她在轨道上运转。由此你就能推测出男孩，也就是黑洞的存在。”判断双星系统中看不见的伴星的质量很关键，如果伴星的质量超过了中子星质量的上限，那就可以认为这颗伴星就是一个黑洞。

除了质量判据以外，光学上看不见的伴星是否有 X 射线辐射也是一个重要判据。黑洞具有极强的引力，会将周围的所有物质都拉了过来，这个过程就称为吸积。通常会有一个吸积盘围绕着它。受黑洞吸积的物质，可以获得很大的动能，并因此产生引力辐射及各种波段的电磁辐射。当周围物质源源不断流入黑洞，就会发射出强烈的 X 射线。观测和研究 X 射线源成为寻找黑洞候选者的一种有效方法。不过，中子星吸积伴星的物质也会发出很强的 X 射线，已经发现了众多 X 射线双星系统，其中可能有黑洞。所以，在 X 射线双星中暗天体质量的大小，又成为区

分中子星和黑洞的很重要的判据。目前只能依靠双星的光学观测来估计这系统中两个星的质量。

天鹅座 X-1 是具有很强 X 射线辐射，在 X 射线源处有一颗明亮的质量大约在 25～40 个太阳质量的蓝巨星，它们是一对密近双星。双星的轨道周期为 5.6 天，可以计算出天鹅座 X-1 的质量约为 7 个太阳质量，大大超出了中子星的质量上限，可能是一个黑洞。天鹅座 X-1 所发射的 X 射线没有规则的脉冲结构，只是不规则的短时标脉动涨落，呈噪声特征。因此，天文学家比较相信天鹅座 X-1 的 X 射线辐射是黑洞吸积物质的结果，它成为第一个公认的黑洞候选者（见示意图 10-6）。不过，也有学者用别的方法估计距离，推测得到伴星的质量在中子星的质量上限附近。因此，还不能完全确定发现了黑洞。类似天鹅座 X-1 的黑洞候选者还有一些，如大麦哲伦云中的 X 射线源 LMCX-3，质量在 7 到 14 个太阳质量之间。哥白尼卫星发现的天蝎座 V861 是一个 X 射线源的双星系统，X 射线源的质量约为 12～14 个太阳质量，因此也成为黑洞的候选者。

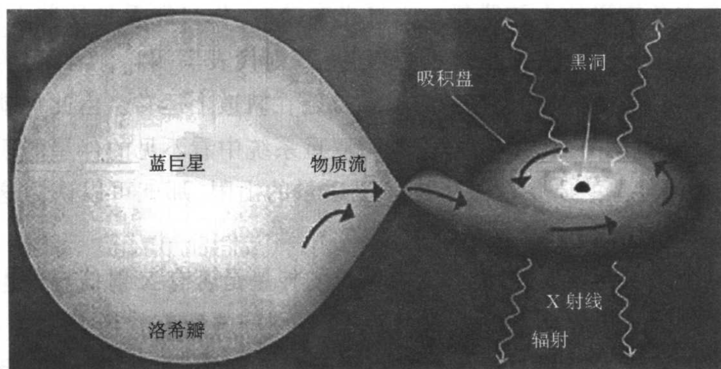


图 10-6　恒星级黑洞候选者——天鹅座(Cygnus)X-1 的示意图

2. 银河系中心是否有一个超大质量黑洞?

在光学观测拍摄的照片上，银河系中心是漆黑一团，这是由于银河系中心方向上的尘埃和气体的消光作用所致。1971 年，两位英国天文学

家(Lynden-Bell 和 M. Jrees)指出，银河系的中心应该有一个大质量的黑洞，这个黑洞从周围吸入气体物质时，气体螺旋形地掉入黑洞，形成一个环状的吸积盘，这个盘将会发出强大的射电波和红外波。据此，他们预言银河系中心应该有一个很强的射电源或红外源。

果然，1974 年天文学家应用高分辨率的射电干涉观测发现了人马座 A 这个强射电源(图 10-7)。后来，又探测到该射电源的红外和 X 射线辐射。从图 10-7 上可以看出，该射电源由东西两部分组成，后来确认西边的源中可能有一个大质量黑洞，把这个射电源称为人马座 A* (SgrA*)。

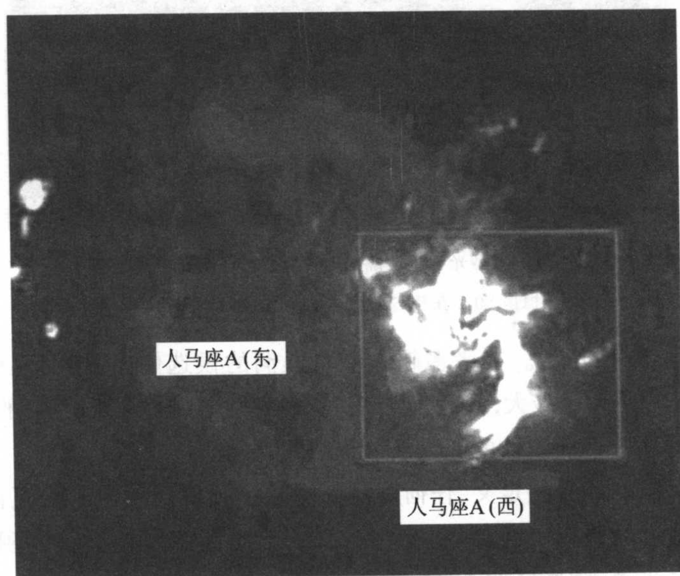


图 10-7 银河系中心的射电源人马座 A，其中可能有一个超大质量黑洞

欧南台的甚大望远镜(VLT)和凯克望远镜的近红外高分辨率观测发现，在 SgrA* 周围 1 角秒处的一颗年轻的恒星围绕 SgrA* 作轨道运动，测得其轨道周期为 15.56 年(图 10-8)。由此估计出 SgrA* 的质量为 $4\times10^6 M_\odot$，也就是 4 百万个太阳的质量。如果 SgrA* 是一个黑洞，可以由它的质量计算出它的史瓦西半径，$R_S=2GM/c^2=0.08$ AU，AU 是天文单位，1 AU 约为 1.5 亿千米。银河系中心离我们的距离为 8 kpc，黑洞

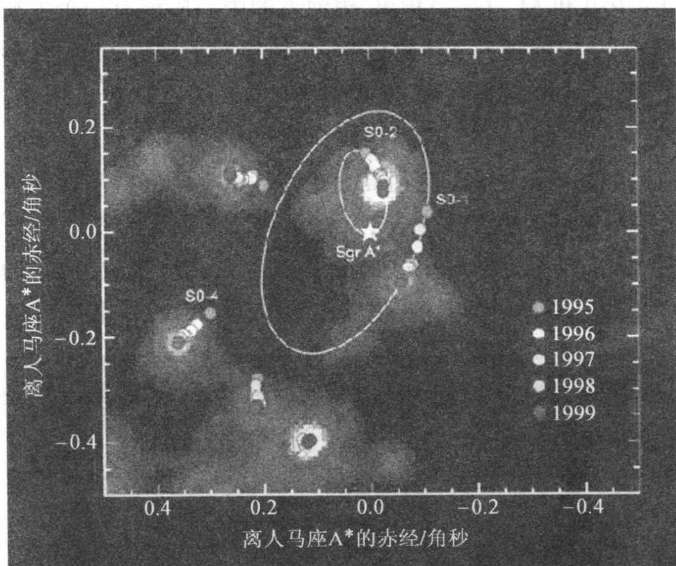


图 10-8　大型光学望远镜在近红外波段观测到一颗年轻恒星 S0-2 在绕 SgrA* 运动,周期为 15.56 年

的角径为 10 微角秒。在诸多超大质量黑洞的候选体中,银河系中心黑洞(SgrA*)是角径最大,离我们最近,流量密度最高(达到 1 Jy)的,因此是最好的便于观测确认的超大质量黑洞候选体。

由黑洞的视界的定义,任何观测到的最小辐射区域应与史瓦西半径相当。最近的研究表明,黑洞存在一个 5 倍史瓦西半径大小的阴影区,对 SgrA* 来说,阴影区约为 45.48 微角秒。要进一步探讨 SgrA* 是不是黑洞,就要设法测出 SgrA* 的大小,这就要求射电望远镜的空间分辨率接近 5 倍史瓦西半径的程度。

美国甚长基线干涉阵(VLBA)的基线达到 8600 千米,其最短观测波长是 3.5 毫米,成为世界上分辨率最高的地面望远镜系统。我国年轻学者沈志强博士等应用 VLBA 观测 SgrA* 的研究工作取得了重要结果,2002 年他们应用 VLBA 观测 SgrA*,获得第一张在 3.5 毫米处的高分辨率 VLBI 图像,首次揭示其椭圆状视结构,推测出沿东西方向的固有大小

在 1 个天文单位以内，这比红外观测确定的大小要小 1600 倍，只比这个黑洞的史瓦西半径大 13 倍，比这个黑洞的阴影大 2.6 倍。射电源的观测需要考虑星际介质的散射效应，射电波被等离子体介质散射，其散射角与波长的平方成正比，当散射角比射电源真实尺度大很多时，我们就测不出射电源的大小。图 10-9 是沈志强博士等利用 VLBA 在五个波长(0.7，1.35，2.0，3.6 和 6.0 厘米)的几乎同时观测得到的 SgrA* 的图像(图上半部)，其尺度随波长的变化与一个点源因星际介质散射引起放大图像很像(图下方的理论计算结果)。由于散射效应随观测波长平方减小得很快，所以在更短波长上观测将可能获得其真实结构和大小。

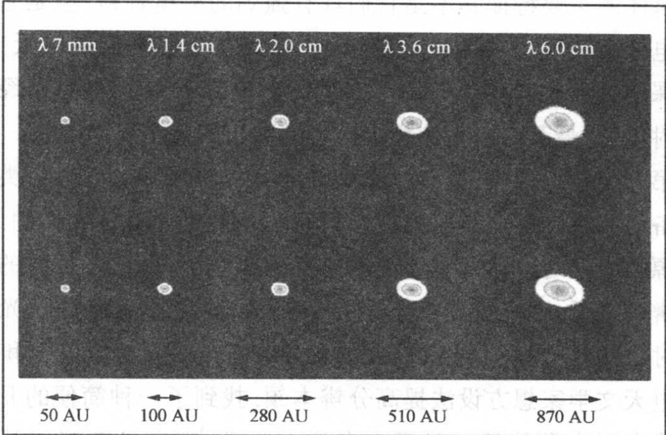


图 10-9　VLBA 在 5 个波段上对 SgrA* 的观测结果(上半部)，
及点源因星际散射引起的不同波段上的图像(下半部)

著名的超大质量黑洞候选者还有几例。在赛弗特星系 NGC4258 中的黑洞，其质量非常大，约为 $39\times10^6\ M_\odot$，但离我们特别遥远，距离约为 7.2 Mpc，虽然该黑洞的史瓦西半径比较大($R_S=0.78$ AU)，但是角径却非常小，仅 0.1 微角秒(μas)。椭圆星系 M87 中的黑洞的质量更大，约为 $3\times10^9\ M_\odot$，但距离更远(14.7 Mpc)，史瓦西半径虽然达到 0.001 光年，但角径仅有 4 微角秒。

五、谜一样的天体——类星体

类星体是20世纪60年代天文学四大发现之一，是射电天文的又一重大贡献。自类星体被发现之后，就由于它极其奇异的特性而引起了天文学家的格外重视。可是，人们用现在的理论却无法解释它们的特殊表现，类星体究竟是一种什么样的天体，至今仍是一个难解之谜。

1. 类星体的发现

类星体的主要特征并不是它们具有强劲的射电辐射，但是它的发现却是射电天文观测的功劳。上世纪30年代发展起来的射电天文，最初的热门课题是巡天以发现人们不知道的射电源。50年代时已经观测到一大批射电源，最著名的是剑桥大学相继推出的几个射电源表。1959年发表的第三个射电源表(称3C星表)共包含471个射电源，为类星体的发现准备了条件。天文学家迫切想知道这些射电源是什么样的天体，寻找射电源的光学对应体就成为观测研究的热点了。但是，那时的射电望远镜分辨率很低，不能确定它们的准确位置，也就不可能确认光学对应体。当时只找到一些视面积较大的光学对应体，如气体星云和河外星系。射电天文学家想方设法提高分辨本领，找到了一种简便的月掩星的方法来确定射电源位置。月亮在白道上运动，它有可能挡住某些射电源。如果射电源是像恒星一样的点源，月亮遮住它时会突然地切断它的射电波。月亮的位置可以根据天体力学的方法准确地算出来，只要精确地测量出月亮挡住某个射电源辐射的时刻，就能比较准确地定出它的位置，从而能比较可靠地寻找射电源的光学对应体。实际上，月掩星的方法也可以用来测量恒星的直径。测出刚刚遮挡时刻和完全遮挡时刻就可以计算出恒星的直径。

1960年美国天文学家桑德奇利用这个方法确定了射电源3C48的位置，找到了它的光学对应体。结果奇迹出现了，对应体是一个视星等为16等的天体，暗弱得很像一颗恒星，它的光谱很特殊，有几条发射线，

又宽又强。恒星光谱有很强的发射线是很普遍的,但3C48的发射线却找不到对应的元素。到了1962年,英国天文学家哈扎德又用月掩射电源的办法确定了射电源3C273的位置,也找到了光学对应体,是一颗视星等为13等的蓝色“星”(图10-10)。同样,3C273的光谱也很特殊。天

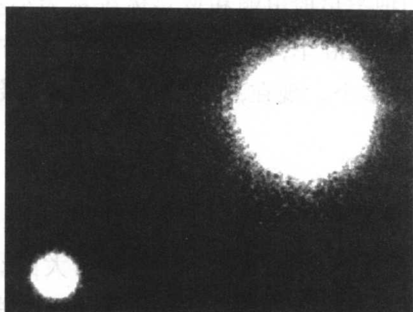


图10-10　类星体3C273(右)的光学照片

文学家对这一观察冥思苦想,得不到答案。这种奇怪的天体被命名为类星射电源。1963年2月荷兰天文学家施米特(图10-11)也观测了3C273,当他面对3C273的神秘光谱撰写观测论文时,突然闪电般地产生一个念头:如果3C273具有非常大的速度的话,谱线红移将会使常见的谱线的波长发生很大的变化,变得面目全非了。经过计算,他发现当这个类星射电源以47 000千米/秒的速度离开我们时,也就是红移量等于0.158时,它的发射线光谱与氢原子光谱一致。银河系中的天体不可能有如此高的速度,因为这个速度将使它离开银河系。3C273奇怪的光谱对应的是我们熟知的元素,如氢、氧、氮、镁等。回过头来,再检查射电源3C48的光学对应体的光谱,一目了然。还是一些熟知的元素,只是退行速度更大,达到110 000千米/秒,表现在光谱上就是它的光谱线的频率变低了,发生了很大的红移,z =



图10-11　揭开类星体谱线红移之谜的马丁·施米特

0.367。而3C273的红移 $z=0.158$。

1965年以后，光学观测发现一些性质与类星射电源类似的星体，它们的紫外辐射非常强，但并不发出很强的射电辐射。人们把它们称为蓝星体。蓝星体也成为类星体的候选者，搜索此类天体立即成为当时的热点课题。今天，人们把类星射电源和蓝星体统称为类星体。到1979年，发现的类星体总数约1000个，其中大部分是用光学方法发现的蓝星体，类星射电源只有300多个。现在，类星体的数目已有数万之多。

2．什么是宇宙学红移

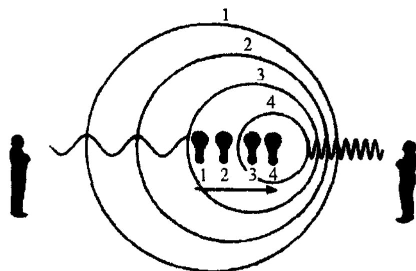


图10-12 多普勒效应原理图

类星体的最大特点是它的谱线有非常大的红移。多普勒效应在天文学上是常见的。早在1842年奥地利物理学家多普勒发现声源与观测者相对运动时，观测者听到的声音会发生变化，当声源朝观测者方向运动时，声波的波长变短，音调变高；当声源离观测者而去时，波长变长，音调变得低沉。图10-12是产生多普勒效应的原理。多普勒效应适用于光波、无线电波以及其它电磁振荡。在可见光区，红光的波长最长，紫光的波长最短，所以天体的退行使光波的波长变长，称之为红移。图10-13显示红移与距离的关系，相同元素的同一根谱线，随天体距离的增加，其红移也增加，这是因为远处天体离我们而去的速度更大。

红移值由观测波长 λ 和在地球上实验室测定的波长 λ_0 来确定，其定义是

$$z=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}。$$

由于观测波长总比实验室的波长大，z 总大于零。观测发现星系的谱线都有红移，也就是谱线的波长都变长了。例如，某星系的某一谱线

波长为 515 纳米，但在地球上看来，同一谱线的波长为 500 纳米，那么波长的变化为 15 纳米，原本波长为 500 纳米，所以红移量 z 等于 0.03。

红移与速度的关系是：

$$1 + z = \left(\frac{1 + v/c}{1 - v/c}\right)^{1/2}$$

其中 c 为光速，在天体的速度远比光速小时，公式可简化为

$$z = v/c$$

在这种情况下，谱线的红移量就代表了距离。由于类星体的红移都很大，它们都是非常遥远的天体。用多普勒原理的红移机制来解释类星体的红移可以得出所有类星体都以很高的速度离我们而去的结论，也就是说宇宙在不断地膨胀。这成为宇宙演化的一个重要观测事实。因此，人们把这种多普勒红移称为宇宙学红移。

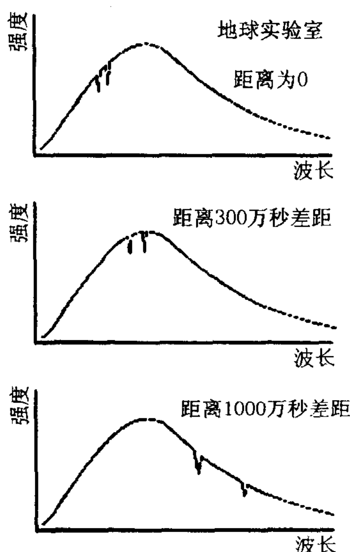


图 10-13　谱线红移

六、类星体的挑战

类星体是迄今为止观测到的最明亮、最遥远、最古老的天体。它的巨大的红移、可以与光速比拟的退行速度和巨大能量向天文学和物理学提出了挑战。类星体并不是恒星，可能是星系核。但是，至今天文学家仍然不能确定它究竟是什么天体。

1. 类星体是什么？

类星体虽然看上去很像恒星，实际上与恒星有本质的差别。银河系内的恒星除了射电脉冲星外，它们的射电辐射都远远不及类星体。恒星的光谱有红移也有蓝移，这是由于处于银河系内的恒星，有的正在趋近

我们,有的正在远离我们的缘故。类星体的光谱是清一色的红移,而且都非常大。在银河系内没有找到具有类星体特性的天体。河外天体都有红移,这是宇宙膨胀的结果。因此,公认的看法认为类星体是河外星系那样属于银河系外的天体。

在河外星系中有一类性质特殊的星系被称为活动星系,例如射电星系、N型星系、赛弗特星系等。活动星系中发生着激烈的物理过程,如恒星爆发、喷流和激波。在各个波段都有很强的辐射。后来查明,这些激烈的过程均发生在星系核心部分或由核心部分激发而成。天文学家赛弗特对一类星系进行了系统的研究,发现它们具有明显的星系核和强的发射线,后来天文学家就将它们称为赛弗特星系。具有很强射电辐射的射电星系中也有部分具有很强的核。这些活动星系虽然彼此之间差别很大,但有一共同的特点,就是它们的中心都有一个处于猛烈的活动状态的星系核。例如,射电星系中有双源结构,其中心有一个辐射特别强的致密的核。头尾星系像一个蝌蚪,致密的头部辐射也特别强。类星体的射电辐射的性质和射电结构就很像射电星系和N型星系的核。而类星体的光学辐射则类似于赛弗特星系的核。不少天文学家认为,类星体就是星系核。由于类星体特别遥远,特别明亮的星系核掩盖了其余部分,使我们只能看清活动星系的核。因此,无论是射电辐射还是光学辐射,所观测到的类星体的角直径很小,看去就像是一颗恒星。当然,类星体与活动星系核能否画上等号还有待进一步证实。

类星体的最重要特性是光谱线发生了巨大红移,比河外星系的红移还大得多。由哈勃定律计算出的类星体距离使人们感到十分震惊:它们都远在几亿光年或几十亿光年以外,甚至有的离我们近200亿光年。这比许多河外星系远得多。我们目前所观测到类星体的光是几亿年或上百亿年以前发出的,所以说,类星体是我们观测到的最古老的天体了。

2. 类星体的挑战

类星体光谱线中的特别巨大的红移,引发了一系列的难解之谜。哈勃定律是根据河外星系距离和由红移推算出的速度得到的关系式。如

果推广应用到类星体上也是正确的话，那么离我们如此之远的类星体的辐射竟然能被地球上的光学望远镜和射电望远镜接收到，它们的光度该有多大啊！对一般类星体而言，它的光度竟达太阳光度的十万亿倍左右，是整个银河系总光度的100倍，有些射电类星体的光度超过银河系的十万倍。一个体积不超过太阳系的天体，亮度超过包含2千亿颗恒星的银河系。类星体每秒钟释放的能量无法用现代熟知的热核反应来解释。这就成为困扰广大天文学家的类星体的能源之谜。

还有一个困扰的问题是类星体的速度。根据哈勃定律，我们可以计算出类星体的速度。目前，红移最大的类星体是SDSS100+0524，达到6.28。它的速度竟达到光速的96%。一个巨大的星体的运动速度能有这么高，天文学家无法解释。

有一种看法认为，类星体的红移不是宇宙学的，也就是说红移量不代表类星体的退行速度。有些观测事实支持这种观点。实际观测发现有的类星体红移很大，但它却和红移很小的星系成协。成协就是它们彼此之间靠得很近，两者与我们的距离差不多。例如星系NGC4319的红移为0.006，而马卡良205号类星体的红移是0.07，两者相差10倍多，但是它们却成协。如果，这种看法能够成立，类星体就不一定是极其遥远的天体了，上面讲的两大困扰就不存在了。但是，这种看法并没有在理论和观测两个方面找到强有力的根据。

有的科学家提出非宇宙学红移可能是由引力造成的，任何一个周期性过程在引力的作用下都会变慢，称之为引力红移。强大的引力可以产生明显的红移，理论计算表明，一个单个天体的引力红移不可能大于0.65，但是很多类星体的红移都大于1。所以这种看法也遇到了困难。

1979年发现了第一个称之为引力透镜的类星体。观测发现两个靠得很近的类星体，它们的红移一模一样，都是1.45，其它观测特征如连续光谱、谱线等几乎完全一样。在类星体的近旁有一个红移为0.36的星系。这两个一模一样的类星体究竟是怎么回事呢？按宇宙学红移的观点，类星体的红移比星系大表明它比星系离我们更远。类星体的光射到我们之前，先要经过这个星系，按照广义相对论原理，光线在引力场中要

弯曲，类星体的光线经过星系附近时被弯曲，我们观测到的仅是类星体的两个虚像。星系在这里起到了一个透镜的作用，也就是引力透镜现象。图 10-14 和 10-15 分别是双类星体和爱因斯坦环产生的引力透镜原理示意。引力透镜的观测事实支持类星体红移是宇宙学的结论。

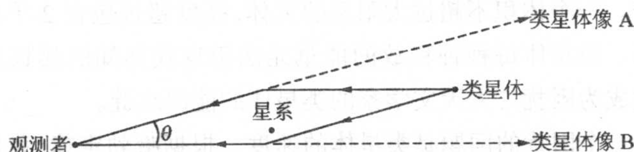


图 10-14　双类星体引力透镜原理图

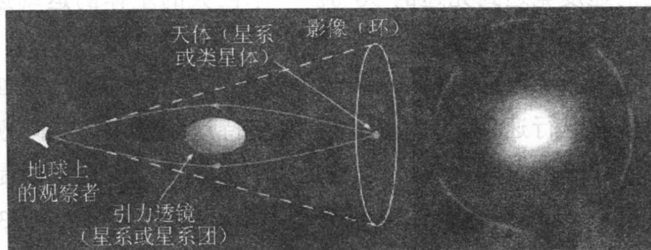


图 10-15　引力透镜的像——爱因斯坦环形成的原理

目前流行的引力透镜的研究指出，已发现的遥远类星体中可能有多达 1/3 是被引力透镜放大了的，其亮度可能增加了 10 倍甚至 100 倍。因此类星体的实际亮度可能低很多。引力透镜的发现大大缓解了类星体能源的困惑。

几十年来，科学家对类星体如此强大的辐射来源提出了各种猜测。其中“黑洞说”比较流行。这一说法认为，类星体是剧烈活动的星系核，星系核中包含着一个巨型黑洞。由于黑洞不断吸食它周围的巨大气体尘云，物质被黑洞吸入时，释放引力能，变成可见光、无线电波、X 射线、γ 射线等波段的辐射。凭借观测到的类星体的辐射特征，可以估计黑洞的质量和黑洞吸入物质的速率。计算表明一个类星体可能包含着 30 亿个太阳质量的黑洞，这个黑洞每年要吞食 100 个太阳系的物质。不过，“黑洞说”还仅仅是一种猜想，类星体究竟是什么仍然是个谜。

思考和复习题:

1. 计算半径为 10 千米、质量为 1 个太阳质量的中子星的逃逸速度。
2. 试简述史瓦西黑洞和克尔黑洞的特性。
3. 简述霍金对黑洞理论的贡献。
4. 什么是类星体? 设某两个类星体的红移是 0.1 和 3.2, 试计算类星体的退行速度。
5. 试说明类星体能源之谜是怎么回事。

第十一讲

揭秘银河系

我们的太阳系在银河系中，我们只能从银河系的内部观测它，这与观测任何其它天体都不一样。这使得弄清楚银河系的形状和结构很不容易。最先给出银河系结构的是英国天文学家赫歇尔(1738—1822)，他十年如一日地观测了十几万颗恒星，被誉为“恒星天文学之父”。在详细研究恒星的距离和空间分布以后，他得出银河系的大致图像，把人们的目光从太阳系延伸到广阔的银河系，成为人类认识宇宙历史上一个重要的里程碑。银河系由上千亿颗恒星、众多的星团、星云和星际介质，以及隐藏着的暗物质组成。我们对构成银河系的天体的研究较之其它星系细致得多，深入得多。银河系成为其它河外星系，乃至整个宇宙的一面镜子。目前，银河系的中心性质仍是天文学家关注的焦点。银心是恒星较密集的部分，并且越靠近中心的部分就越密集。银心附近充满了大量的尘埃，挡住了可见光的传播，使光学望远镜无法窥视银河系中心的秘密。天文学家通过射电、红外和 X 射线波段的观测，得到了来自银心的许多信息，成为探索银河系中心秘密的重要手段。初步查明，银河系中心并不是简单的恒星密集，很可能存在着一个质量很大的黑洞。

一、银河和银河系的发现

自古以来人们就知道有银河，但不知道银河是什么。400 年前伽利略通过望远镜揭开了银河的秘密。银河系的发现更不容易，由于我们太阳系也在其中，很难观测它的全貌，可谓是“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。英国天文学家赫歇尔经过连续十来年的辛勤观测和研究才初步确认银河系的存在和结构。

1. 银河

夏秋两季，在晴朗无月的夜晚，我们抬头仰望天空，就会发现有一条白茫茫的光带，像一条奔腾的大河从北到南横跨天空。这就是银河，民间俗称天河。银河浩浩荡荡，经过了很多著名的星座，例如天鹅座、英仙座、双子座、猎户座等等共 20 多个。如果你仔细观察一下还会发现，一年四季当中，银河的变化是很大的。春季，人们看不到它的踪影；夏季，它从西南到东北，横跨整个天空，最宽的地方达 30 度，中间还有一个分叉，蔚为壮观；秋季，它在空中的位置虽已偏北，但浩气犹存；冬季，它非常暗淡，不注意看就不容易发现它的存在。

自古以来，气势磅礴的银河就是人们十分注意观察和研究的对象。但是，古时候人们不知道银河是什么，于是就产生了许多有关银河的传说和故事。我国古代把银河想像成天上的河流。有一个十分美丽的神话故事，说的是玉皇大帝的女儿织女私自下凡嫁给了一个普通的庄稼汉牛郎，生了一儿一女。王母娘娘发现后非常生气，勒令织女返回天界。牛郎舍不得爱妻，用一条扁担挑起两个孩子在后面紧追。王母娘娘见状从自己的头上拔下一根玉簪在天上一画，就画出了一条大河，把牛郎和织女生生分隔开来。有关牛郎织女的故事动人心弦，事实上夜空中的牛郎星和织女星也十分美丽。牛郎、织女二星遥遥相对于银河两旁。牛郎星是天鹰座中最亮的星，西名天鹰座 α，中名叫河鼓二，民间俗称扁担星。扁担的两头各有一颗小星，那就是牛郎挑的一对儿女。织女星是天琴座

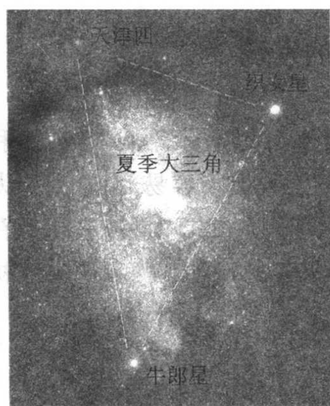


图 11-1 牛郎星、织女星和天津四组成了醒目的夏季大三角

中最亮的星，西名天琴座 α。在织女星的旁边有四颗小星大致组成了一个小的平行四边形，这是织女用来编织美丽的云霞和彩虹的梭子。在全天最亮的 21 颗恒星表中，牛郎星和织女星都榜上有名，织女排名第 5，牛郎屈居第 11。牛郎星距离地球 16.5 光年，织女星距离地球 26.3 光年，它们之间的距离为 16 光年，牛郎给织女打个电话也需 16 年才能接到，每年七月初七的鹊桥相会只不过是人们心中的美好愿望罢了。隔河相望的牛郎星、织女星，与位于银河中的天津四（天鹅座 α 星）组成了一个大三角形，称作夏季大三角，在夏夜星空中十分醒目（图 11-1）。

在古代罗马神话中，把银河说成是奶路，是主神朱必特的妻子朱诺的乳汁流淌而成的。朱必特与一个民间少女相爱并生下一子，为了让这个孩子能够长成最伟大的勇士，朱必特趁朱诺睡着的时候，让这个孩子去吸她的乳汁（图 11-2）。朱诺被惊醒了，并且生气地将孩子推开，结果她



图 11-2 西方名画：朱诺射出的乳汁形成了银河

的乳汁喷射出来形成了银河。英语中的银河一词“milky way”,就是由此而来的。在古代印度则把银河视为一条超度亡灵、通往西天极乐世界的大道。

银河究竟是什么呢?望远镜发明之后,这个问题才得到了正确的答案。1609年,当伽利略把他自己制造的望远镜对准了银河的时候,他惊喜地看到了一番奇异的景象:“透过望远镜你会看到多如牛毛的星星,繁星点点,难以置信。银河……实际上不是别的,而是密密麻麻聚集在一起的不计其数的星星。不管望远镜指向哪儿,一大群星星立刻呈现在眼前。其中有些相当大而且明亮,小星星则更是难以数计。”人们终于弄清楚,横贯天穹的、白茫茫的银河并不是什么河,而是由许许多多的恒星汇集在一起而形成的。由于这些恒星距离我们太远,人的眼睛分辨不清一颗颗的星点,所以才把它看成是一条亮带。银河的秘密终于被揭开了。

2. 赫歇尔与银河系的发现

望远镜帮助人们揭开了银河的秘密,新的问题又摆在了人们面前。银河是一个什么样的天体系统?银河与满天的繁星以及我们的太阳又有什么关系?18世纪中叶,英国天文学家赖特和德国哲学家康德都研究过这个问题,并且做出了相同的推测。他们认为,银河与天上的所有恒星以及我们的太阳共同组成了一个非常庞大的天体系统。这个天体系统的形状很像一个磨盘,我们的太阳也在这个磨盘中。他们的这种猜想是否正确呢?发现天王星的著名英国天文学家威廉·赫歇尔决心用实际观测的结果来检验它。1776年,他开始系统地研究恒星计数工作,想弄清楚天上的恒星是不是与银河共同组成了一个更大的天体系统。他把天空按照经纬度划分成1083个区域,然后把望远镜一次又一次地对准一个又一个的星区,他辛勤地观测着一颗又一颗恒星,春夏秋冬,年复一年。

赫歇尔专心于天文科学事业,直到50岁才与一位愿意为他提供研制大望远镜资金的有钱的寡妇结为夫妻。52岁时才得一子,后来他的儿

子约翰·赫歇尔也成为著名的天文学家。赫歇尔的妹妹卡罗琳·赫歇尔终身做他的助手。无论寒冬还是酷暑兄妹都在一起通宵达旦地进行观测,而妹妹卡罗琳则总是拿着纸笔帮哥哥作记录;每次观测结束之后又是卡罗琳协助订正记录,做第二天晚上的观测准备等等。她一心为了科学事业而终身未嫁,一直工作到90多岁。赫歇尔到80岁时还在观测星空。卡罗琳有一本从不间断的日记,详细地记录了他哥哥整整50年的工作史,其中有一段描述当赫歇尔因为磨制工作紧张得放不下双手时,卡罗琳亲自一口一口给这位比自己年长12岁的哥哥喂饭的情景,令许多人感动。

经过了连续十来年的辛勤观测,他们一共观测了117 600颗恒星。赫歇尔被人们誉为恒星天文学之父。通过这些观测资料,赫歇尔发现离银河平面越近,星的数目越多,恒星越密集。他还按照恒星的视星等,分别计算恒星的数目,并进一步分析了天空各个方向不同距离上的恒星分布情况。最后赫歇尔终于得出了银河系的大致图像,于1785年发表了他的论述。他认为银河系确实是一个呈扁平形状的恒星系统,是由天上恒星与银河共同组成的。它的长度和厚度大约是6∶1,好像一块边缘不那么整齐的大烧饼,太阳在这个大烧饼的正中心(图11-3)。

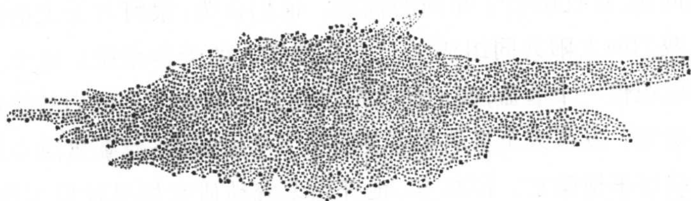


图11-3 赫歇尔的银河系模型

当然,赫歇尔得出的结论并不完全正确,比如,太阳就不在银河系的中心。但他所描绘的银河系图像,像哥白尼提出日心学说一样,大大地扩大了人类的眼界,是人类认识宇宙历史上一个重要的里程碑,为后人进一步探讨银河系的奥秘奠定了良好的基础。

二、银河系大小之争

随着观测手段的进步，从 19 世纪下半叶起，天文学家开始用照相方法观测恒星，这比赫歇尔时代虽然用望远镜但却是用肉眼观看来确定恒星的位置要精确多了。这时，天文学家已经掌握了一些测量恒星距离的方法，有利于确定银河系大小。关于银河系的尺度，曾出现激烈的争论。主要是荷兰天文学家雅各布·卡普坦(1851—1922)和美国天文学家哈罗·沙普利(1885—1972)分别提出的大、小银河系模型。

1. 卡普坦的小银河系模型

卡普坦是一位没有使用过望远镜的著名天文学家，他利用许多天文台拍摄的天体的照相底片，测量恒星的位置和亮度，进行恒星计数的研究工作，把银河系的研究推进到天文研究的前沿。1906 年，他提出一个大胆的巡天观测计划，在天球上不同的部位选出 206 个小区域，请求世界各地的天文学家进行观测。那时，他只知道极少数恒星的由视差测量得知的距离，无法估计银河系的大小。他不得不用数千颗恒星的自行来代表恒星的视差。自行是指恒星自身的运动导致在天球上位置变化的角度，如每年移动了多少角秒。如果所有恒星的运动速率和方向都一样，自行的确可以代表视差的大小。远处的恒星自行小，而近处的恒星自行大。虽然各个恒星的运动速度很不一样，但平均来说这个趋势是存在的。他在 1920 年和 1922 年发表了他所构造的银河系模型，银河系是一个由恒星组成的盘，直径为 5.5 万光年，厚度为 1.1 万光年，包含了 474 亿颗恒星。太阳靠近银河系中心，银心在北天的仙后座。这个模型被人们称为卡普坦的小宇宙。这与当今公认的银河系结构大不相同。卡普坦花了 40 年的心血研究得到的银河系尺度偏小，主要的原因是他对银河系内的无处不在的星际介质及其消光作用缺乏认识。当时，已经有一些天文学家研究星际介质及其消光作用，卡普坦也曾进行星际介质吸收的研究，承认“星际介质对光的吸收，哪怕是很小的吸收也将改变我

们对恒星在天空中分布的研究结果。”然而，他仍然按照没有星际吸收构造自己的模型，终于酿成苦酒。当然，他的模型给出的银河系中心方向和太阳在银河系中的位置也是不正确的，导致他在这场大辩论中败北。

2. 沙普利的大银河系

在那时，河外星系还没有发现，天文学家就是把银河系当作宇宙来研究。比卡普坦年轻很多的美国天文学家哈罗·沙普利对卡普坦的小宇宙提出了挑战，他提出的银河系大得多。他是在 1914 年到美国威尔逊山天文台工作，从事球状星团的研究。球状星团的空间分布曾使天文学家疑惑不解，它们在天空中的分布很奇特，绝大部分都分布在人马座方向及其附近的天区。按照宇宙的普遍规律，球状星团应该像其它天体一样分散在银河系中心以外的四面八方，如果太阳系位于银河系的中心，那我们就应该在天空各处都能看到它们。是什么原因导致了球状星团分布的不均匀呢？沙普利对这一不同寻常的天象进行了深入的探索和研究。他利用当时世界最大的口径 2.5 米的望远镜，仔细地观测分析了六七十个球状星团的状况，并将它们与太阳附近的恒星加以比较。他发现球状星团都是很遥远的天体，它们的距离大都在几万光年以上。

与卡普坦利用恒星来研究银河系不同，沙普利利用球状星团来研究



图 11-4 把太阳从银河系的中心请了出去的美国天文学家沙普利

银河系，更大的区别是关于天体距离的估计方法。沙普利求助于一种特殊的变星——造父变星来估计距离。沙普利认为，球状星团分布在银河系中心的四周，但因为太阳系并不是在银河系的中心，所以我们看到的球状星团的分布，就集中在银河系中心的方向，也即人马座的方向。因此，银河系的中心应该在人马座方向，距离我们好几万光年的地方。沙普利描述的银河系图像，反映了这个庞大天体系统的真实面貌，得到了现代天文学家的公认。不过，沙普利给出的银河系直径为 33 万光年，太阳离银心 6.5 万光年。这比实际的银河系大许多。其原因是他最初确定的 3 个球状星团的距离有误。但是他对太阳在银河系中的位置和银河系中心的方向的判断却是正确的。因此，大多数天文学家认为沙普利的“大银河系”优于卡普坦的“小银河系”。选择球状星团来研究银河系结构是他成功的关键，球状星团是众多恒星组成的集团，当然比单个的恒星亮许多，因此可以看到很遥远的球状星团。他用球状星团中的造父变星来估计距离也是聪明之举。卡普坦研究 40 年所获得的结果几乎全被沙普利仅用很短的时间完成的“大银河系”所打倒。许多年后，人们承认沙普利的银河系模型基本是对的，当然要进行必要的修正。

3. 目前国际公认的银河系模型

如图 11-5 所示，当今公认的银河系结构是这样的：如果我们能乘宇宙飞船到银河系之外十分遥远的地方再回过头来看看我们的银河系，你会看到它的形状很像我们体育运动用的一种器具——中间凸、四周薄的大铁饼。银河系的质量约为 1.4×10^{11}个太阳质量。它由银盘、银晕、核球和旋臂等组成。“大铁饼”中心凸起的部分称为核球，是银河系物质密集的地方，直径约为 1.3 万～1.6 万光年，其边缘扁薄的部分称为银盘。银河系并没有一个明显的边界，只是越到边缘天体越少。银盘的直径为 8 万光年（以前认为是 10 万光年，后来国际天文学会将它改为 8 万光年），中心厚约 0.6 万光年，边缘厚约 0.2 万～0.3 万光年。包围在银盘周围的、物质稀疏的、范围很大的球状区域，叫银晕。太阳位于银河系中心和边缘之间，距银河系中心约 2.6 万光年的地方。夏天，地球处于太

阳和银河系核心之间，晚上人们看到的是银河系中心方向的天空，所以看到的恒星就非常多。冬天，地球转到靠银河系边缘的一端，晚上人们看到的是银河系边缘方向的天空，所以看到的恒星就较少。

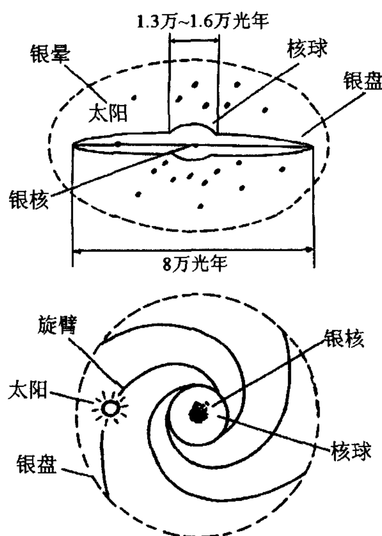


图 11-5 目前国际公认的银河系模型(上为侧视，下为俯视)

银盘中心的核球为椭球形，几条螺旋状的旋臂就从核球两端对称地延伸出来。旋臂也是银河系内物质密集的部分，目前共发现了 4 条，分别叫做三千秒差距臂、英仙臂、人马臂和猎户臂。我们的太阳系就位于猎户臂的内侧(见图 11-6)。恒星和星际物质沿着旋臂分布，就像是一个巨大的旋涡，因此我们把银河系叫做旋涡星系。

瑞典吕德天文台综合了大量照片，按照银道坐标，精心绘制了一幅银河系全景图(见图 11-7)，使我们对银河系的面貌可见一斑。图中银河系右下方的两个小白斑，是大麦哲伦云和小麦哲伦云。

4. 银河系的自转运动

月球有自转运动，地球有自转运动，太阳也有自转运动。人们很自然地就会联想到，银河系是否也有自转运动呢？在发现银河系自转以

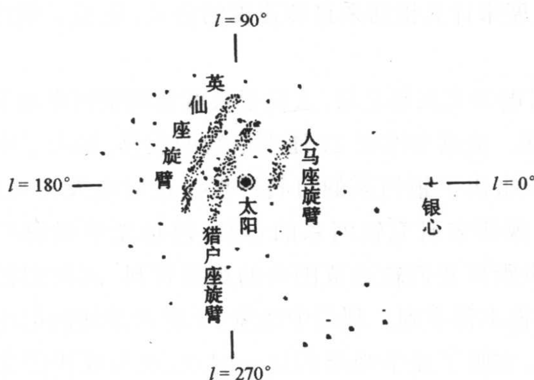


图 11-6　太阳系附近的 3 条旋臂，l 为银经

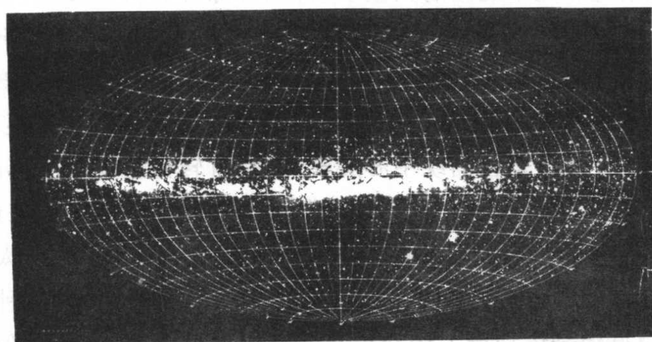


图 11-7　瑞典吕德天文台综合大量观测结果获得的银河系全景图

前，1913 年美国天文学家维斯托·斯里弗发现了一个河外星系(草帽星系)的自转。他发现这个星系的两个边缘的谱线红移不一样，一边的红移比另一边的大。星系两个不同地方的谱线都红移了，说明它整体上是离我们而去，但是除去整体上的离开外，红移小的一边是在向我们运动，而红移大的那边则是远离我们，这说明这个星系在自转。

19 世纪末期，就有天文学家开始利用恒星的自行数据来研究银河系的自转运动，但由于当时资料少、精度低，未能对银河系的自转做出肯定的结论。1924 年，又有天文学家根据恒星运动的不对称性，提出了银河系自转的假说。1927 年，著名的荷兰天文学家奥尔特推导出了由恒星的

自行和视向速度来计算银河系自转速度的公式,证实了银河系自转的假说是正确的。

40年代射电天文兴起之后,人们很快就发现银河系里有中性氢发出的21厘米谱线。根据中性氢21厘米谱线的位移,算出了中性氢云的视向速度,进一步求出了银河系的自转速度。在射电天文兴起之前,人们只能依靠光学观测来研究银河系的自转,但是光学观测有很大的局限性,它只能提供距离我们较近范围内的观测资料,离我们较远范围的资料就不可靠或根本得不到。利用中性氢21厘米谱线的射电观测来研究银河系的自转,克服了光学观测的这一弱点,成为现代研究银河系自转的重要手段。

根据射电和光学观测的大量资料,进行综合分析后发现,银河系的自转情况还是比较复杂的。在靠近银心的地方,接近于刚体旋转。物理学上指大小和形状始终不变的物体为刚体,因此接近于刚体旋转也就是各处的角速度都接近于一样。离银心较远地方的自转情况就很不相同,虽然从整体上看仍是在围绕中心旋转,但是自转角速度却不再相同了,离中心越远,其角速度越小。这种现象称为较差自转。平均来说,在太阳与银河系中心之间的天体绕银心一周的时间比绕行半径与太阳一样或更大的天体绕一周的时间要少。银河系银盘上的天体的这种围绕银心自转,就好像是运动场上运动员在各自的跑道上赛跑,在太阳之内的天体将超过太阳,且超过得越来越多;在太阳之外的天体将逐渐落后,也落后得越来越多。离银河系中心比较远的天体因较差自转而彼此分离。我们的太阳所在处,银河系的自转为每秒约250千米,自转周期为2.5亿年。

三、神秘的银心

从地球上看,银河系的中心即银心位于人马星座内。银心是恒星较密集的部分,并且越靠近中心的部分就越密集(见图11-8)。在离银心32.6光年处,相邻两颗恒星之间的平均距离为仅仅只有0.16光年。而

太阳系附近的情况则不一样，太阳和它最近的邻居——半人马座比邻星的距离尚有 4.2 光年。假如我们处于银心附近，那我们看到的将是比现在更加辉煌的满天繁星。然而，银河系的中心究竟是什么？仅仅是密集的恒星呢？还是另有别的物质存在？这是天文学家一直想解开的一个谜。



图 11-8　银河系中心方向的照片

令人遗憾的是，尽管天文学家把光学望远镜造得越来越大，凭借着这些洞察宇宙的巨眼仍然看不见银河系中心的真面貌。银心附近充满了大量的尘埃，它们就像一层厚厚的面纱，挡住了可见光的传播，使光学望远镜无法帮助天文学家窥测银河系中心的秘密。近几十年来，由于观测手段的不断进步，人们通过射电、红外和 X 射线波段的观测，得到了来自银心的许多信息。红外线和射电波可以穿透尘埃屏障的阻挡来到地球上，X 射线也能穿透尘埃，但却被地球大气层所阻挡，人们可以利用人造卫星到地球大气层以外进行观测。来自银河系中心的红外线、射电波和 X 射线，就像是银河系中心派来的使者，给我们提供了描绘银河系中心图像的依据。

通过观测发现，银河系中心的红外辐射、射电辐射和 X 射线辐射都很强烈，比普通恒星的辐射都强得多，这就说明，银河系中心并不是简单的恒星密集。那么银河系中心究竟是什么呢？

1971 年，两位英国天文学家在分析了对银河系中心的观测结果以后指出，银河系的中心应该是一个有着一定质量的黑洞。他们还预言，如果他们的假说是正确的话，那么，银河系中心还应该有一个强射电源，并且这个强射电源发出的辐射应该是同步加速辐射。几年以后人们果然在银河系中心方向发现了这样一个发出强烈同步加速辐射的强射电源，它就是人马座 A，是迄今人们所知道的银河系内最大的射电源。

通过对人马座 A 的观测和分析,天文学家们发现,人马座 A 的大小与普通恒星相当,但它发出的射电辐射的功率却比普通恒星强上万倍。在人马座 A 的周围,还有大量的电离氢气,正以高达 300 千米/秒的速度向外运动。此外,那里还有强红外源。红外源的大小比射电源更小,而它的红外辐射比射电辐射更强。如此强大的红外辐射不可能是由尘埃产生的,看来应该是由高能电子产生的。

人马座 A 的特征绝不是一般恒星级天体所能具有的。根据天体物理理论,如果银河系中心存在一个大质量黑洞,那么这个黑洞要从周围吸入气体物质。气体螺旋形地掉入黑洞时,会形成一个环状的吸积盘,这个盘就会发出强大的射电波和红外波。天文学家已经在银河系中心方向观测到了人马座 A 这样的强射电、强红外和 X 射线辐射源。但是,仍然需要进一步的研究,现在只能把人马座 A 看做大质量黑洞的最佳候选者。关于银河系中心是否有一个超大质量黑洞的问题已在第十讲第四部分中介绍。

四、银河系的星团

银河系是一个庞大的恒星集团,它包含了至少一千亿颗恒星。这些恒星当中孤身独处的占少数,大多数恒星都是有“家”的。我们已经知道双星和聚星是由两颗或数颗彼此之间存在物理联系的恒星组成的恒星系统,而在银河系中还存在着一种比双星和聚星庞大得多的、彼此之间存在物理联系的恒星集团,称为星团。星团分为球状星团和疏散星团两种。

1. 球状星团

球状星团名副其实,它们的形状都呈球形或椭球形,里面包含着密密麻麻、成千上万颗恒星,越往中心密度越大。我们使用大型天文望远镜也无法将它们的一个个成员分辨清楚,顶多只是在长时间曝光的底片上看出星团边缘的一部分恒星。

球状星团与银核一样是银河系内恒星分布最密集的区域，它们的直径一般为100～300光年，而包含的星却都多达几千颗、几万颗、几十万颗，最多的甚至达几百万颗。假如我们的太阳是球状星团中的一个成员，那么我们的地球在那儿将永远不会有黑夜，它的四周到处都是光辉灿烂、大大小小的“太阳”。

银河系中大约一共有500多个球状星团，至今已经被确认的只有100多个，它们大都分布在银晕中。天文学家认为，银河系中所有的球状星团都分布在一个巨大的球形空间内，这个球的中心与银河系的中心重合。可能还有许多球状星团隐藏在银盘中，但目前还未被人们发现。

同一个球状星团中，各成员星的运动方向和速度以及与我们的距离，都大致相同。星团中的所有成员都被它们之间的引力束缚在一起，步伐整齐、步调一致地像一颗星一样在空中飞驰、运动。它们是同一时期形成的，并都有相似的初始化学成分。球状星团是银河系内很老的天体，它们的年龄大约有100亿年甚至更长。然而近年来，天文学家发现在大麦哲伦云(距离我们最近的星系)中既有年老的球状星团，也有年轻的球状星团。这个发现对于球状星团和恒星演化的理论可能会提出新的挑战。由于球状星团距离我们都比较遥远，所以用肉眼能看见的很少。

半人马座ω星团是全天最大最亮的球状星团，视星等4等，肉眼清晰可见，遗憾的是它位于南天，我国大部分地区都看不到它(图11-9)。17世纪初期，天文学家还不知道它是球状星团，因而把它当作一颗恒星命名。直到1677年，英国著名天文学家哈雷首先发现它比一般恒星显得大些，并且看上去有些模糊，这才得知原来它是一个球状星团。

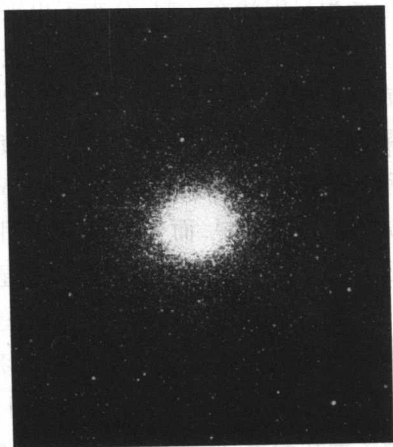


图11-9 全天最亮的球状星团——ω星团

ω星团距离我们1.6万光年，

是我们已知的距离最近的球状星团之一。它的年龄大约为150亿年，和我们银河系的年龄差不多，是最年老的星团。它所包含的恒星估计大约有100万颗。这100万颗恒星密密麻麻地聚集在一起，通过一个较大的望远镜可以把它的外围部分分解开，但是愈往星团中心，恒星密度越大，根本分不清是哪一颗星发出的光，景象相当壮观。

除了ω星团之外，杜鹃座47星团也比较亮，可惜它也在南天。北天比较著名的球状星团是M13，它位于武仙座，夏天夜晚使用一个小型望远镜就可以看到它。彩图19是哈勃空间望远镜拍摄的天蝎座球状星团M80，数以万计金光灿灿的恒星密密麻麻地聚在一起，多么壮观。

2. 疏散星团

疏散星团的外形不规则，所包含的成员星比球状星团少得多，少的只有几十个，最多的也仅有1000多个。然而疏散星团的数目却比球状星团多许多，天文学家估计它们的总数大约有1.8万个，目前人们已经在银河系内发现了1000多个。疏散星团中各个成员之间的距离较大，通过望远镜一般都能将它们分解成单个的恒星。由于银道面附近有大量的吸光物质存在，使得人们常把疏散星团外围部分的成员星与星团附近的恒星混淆在一起，分辨不出来。

相对于球状星团来说，大多数疏散星团都比较年轻。根据疏散星团成员星在赫罗图上的位置，可以把疏散星团分为三类，第一类只有主序星，第二类除主序星外还有一些黄色和红色的巨星，第三类有很多黄色和红色的巨星。疏散星团中的成员星种类十分复杂，一些年轻星团的成员大多是主序星，而一些年老星团中则有很多白矮星，另外许多星团中还有大量的双星和各种类型的变星。

最美丽、最著名的疏散星团是金牛座的昴星团(彩图18)。之所以叫昴星团是因为它所在的位置属于我国古代三垣二十八宿中的昴宿。民间把昴星团又叫做七姐妹星团，因为古时候人们所看到的昴星团是有7颗星聚在一起，而现在只能看见6颗较亮的星了；其中有一颗星变暗了，我们现在用肉眼已经看不见它。由于昴星团的明亮和美丽，自古以来人

们就对它十分注意，并利用它在夜空中的位置来确定季节。例如，我国古代 3000 多年以前的《尚书·尧典》中有一句话："日短星昴，以正仲冬"。这句话的意思是说黄昏以后昴星团升到上中天附近的时候，冬至到了，这时的白昼也就最短。

昴星团是一个比较年轻的星团，100 多个成员中没有年老的红巨星，估计它的年龄大约为 7000 万年，距离我们大约 417 光年。昴星团中最亮的星是昴宿六，它是一颗表面温度很高的蓝巨星。6 颗亮星中最东面的一颗是昴宿七。昴宿七是分光双星，两颗子星的轨道周期长达几年。

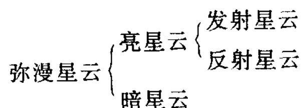
五、银河系的星云

恒星是银河系的主要成员，除了恒星之外，银河系内还有许多由气体和尘埃微粒组成的星云。

星云一般都比较暗弱，人们用肉眼能够看见的只有猎户座大星云。但是，如果通过较大口径的望远镜观测，就能见到一个个星云多姿多彩，十分美丽。每一个星云都是夜空中一道极富魅力的风景线。例如，麒麟座玫瑰星云像一朵盛开的玫瑰花；天琴座的环状星云如同一个十分迷人的玉石指环；狐狸座的哑铃星云好像一个体育锻炼用的大哑铃；猎户座的马头星云酷似一个威武的马头；金牛座的蟹状星云犹如一只横行霸道的大螃蟹；等等。星云可分为弥漫星云、行星状星云和超新星遗迹等三种类型。

1. 弥漫星云

弥漫星云中包含了亮星云和暗星云两种。亮星云中又有发射星云和反射星云之分。如下表所示：



弥漫星云，顾名思义，它们的形状很不规则，呈弥漫状，没有明确的

边界,它们比行星状星云要大得多,但是它们的密度更小,所以亮度更低。弥漫星云的质量相差很大,大的可达太阳质量的几千倍,小的只有太阳质量的几分之一,但大多数为太阳质量的10倍左右。

弥漫星云中的亮星云的发光方式有两类。当星云里面或附近有温度较高的恒星存在时,星云气体吸收了恒星的强紫外辐射并激发出可见光,这类星云也叫发射星云。著名的猎户座大星云就属于这种情况(见图11-10)。而当星云里面或附近的恒星温度较低,紫外辐射太弱,不能激发星云气体发光时,星云就靠其内部的尘埃粒子散射周围星光而被我们看到了。这类星云也叫反射星云。昴星团星云就是这种反射星云的情况。我们直接从望远镜里去看昴星团的话,只能看见很多星而看不到星云,因为星云的光太微弱了。而用照相的方法,可以让它在较长时间内累积更多的光,所以昴星团照片上,每颗亮星周围都有一团发光的星云,非常美丽(见彩图18)。

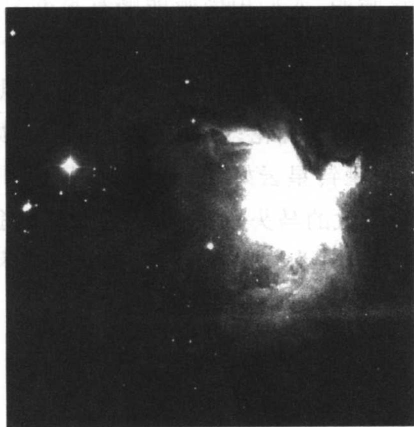


图11-10 最明亮的弥漫星云——猎户座大星云

实际上,发射星云和反射星云,它们本身的物质组成并没有多大区别,只是由于它们附近恒星的温度高低这一外界条件的影响,使它们的发光性质有所不同。它们都属于亮星云。

暗星云也是弥漫星云的一种,只不过它们不发光,是暗黑的一片,所

以叫暗星云。它们的形状和大小也是多种多样的。1784 年，著名天文学家赫歇耳首先发现了它们的存在。他看到亮的银河中有一些黑斑和暗条。刚开始他还以为这是银河中没有恒星的区域。经过仔细的观测和研究以后他发现，这种现象并不是没有恒星的表现，而是由于在这些恒星的前面有一些不发光的弥漫物质将恒星的光遮挡住了而造成的。银河系中的暗星云很多。著名的暗星云有猎户座马头星云(彩图 20)、蛇夫座 S 状暗星云、南十字座中的煤袋星云等等。

马头星云是一个最具特色的暗星云，由于它的形状酷似一匹骏马的头部而得到了这个绝妙的名称。马头星云位于猎户星座中心区域，猎人腰带的下边。马头星云很暗，又不大，很不容易被观测到，因此它到 19 世纪末期才被人们发现。马头星云被发现之后，它那与众不同的奇特形状，立刻引起了广大天文学家和业余天文爱好者的极大兴趣。马头星云位于一个不太亮的条状星云 IC434 的前面，通过小望镜看起来就好像是在 IC434 的东边缘上砍开了一个小小的黑暗的槽口。在大望远镜中，“马头”的形象十分威武。像所有的弥漫星云一样，马头星云中的气体和尘埃都处于杂乱无章的永恒运动状态之中，随着时间的推移，马头的形状不知会变化成什么样子。不过那是十分久远以后的事情了。

暗星云和亮星云的物质成分并无多大区别，只是暗星云所含的尘埃比例更大一些。暗星云本身不发光，它们在亮的星空背景的衬托下，才显出来它们暗黑的形象。许多没有明亮星空背景衬托的暗星云，也就淹没在茫茫的夜空中了。这时候如果再用光学的方法去研究它们就很困难了。天文学家想到了用射电天文方法和红外观测方法来研究它们，获得了成功。观测发现，许多亮星云往往是包含在一个更大的暗星云之中，这可能是与恒星的诞生有关的现象。

目前，天文学家已经观测到多个正在孕育恒星的星云，如猎户座大星云 M42，巨蛇座鹰状星云 M16(彩图 21)，人马座三叶星云 M20 等。哈勃空间望远镜还拍摄到它们内部恒星正在形成时那天翻地覆、波澜壮阔的景象，如图 11-11 和彩图 22 所示的巨蛇座鹰状星云中心部分。



图 11-11 哈勃空间望远镜拍摄的巨蛇座鹰状星云中心部分的照片

极其稀薄的星云怎么会形成光辉夺目的恒星呢？目前流行的观点认为，恒星是由极其稀薄的星际物质凝聚成星云并进一步收缩而形成的。从星云演变为恒星要经过漫长的过程。在地球上，高处的物体因地球的引力而具有势能，物体离地面越高，物体所具有的势能就越大。因此它下落到地面时所获得的动能也越大。这动能是由势能转换的。在自然界中，引力是普遍存在的，在天体的大尺度上，引力超过其它的相互作用力，成为天体和整个宇宙动力学的支配者。很大的星云在引力的作用下会不断收缩，其势能在收缩的过程中要减少，减少的势能有一半转换为恒星内部的热能，另一半转换为向外辐射的辐射能。星云温度在不断提高，并向外辐射能量。这时一颗新的恒星就诞生了。

在星云演化过程中，规模较小的星云形成一个孤立的恒星，大的星云由于密度不均匀，其中有几个质量中心，因而形成双星、聚星或星团。质量非常小的星云，譬如小于太阳质量二十分之一的星云，引力收缩阶段特别长，它们也就不可能收缩成为通常发出巨大光和热的恒星。

2. 行星状星云

行星状星云是银河系中数量较多，外形美丽动人的一类气体星云（见彩图 23—26）。人类发现的第一个行星状星云是 1779 年英国著名天文学家威廉·赫歇尔发现的天琴座环状星云（图 11-12）。当时，在望远镜中它看起来具有像木星或土星那样的略带颜色而有明晰边缘的小圆面，因此赫歇尔把它称为行星状星云。其实，行星状星云与行星并无关系，但这个名字一直沿用下来。

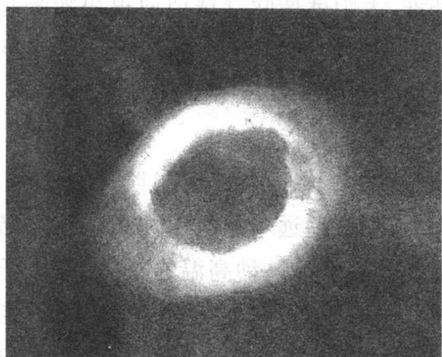


图 11-12　哈勃空间望远镜拍摄的天琴座的环状星云，
该星云是 1779 年赫歇尔首先发现的

行星状星云一般都比较暗，只能用望远镜进行观测和认证。通过大望远镜可以看出，在行星状星云的中心，都有一颗温度很高的恒星，这是星云的中心星。大多数行星状星云都呈绕中心星对称的圆环状或圆盘状。有些行星状星云还具有纤维、斑点、气流及小弧等比较复杂的结构。行星状星云是气体星云，这些气体是在中心星强烈的紫外辐射的激发下发光发亮的。

天文学家们通过对行星状星云研究后发现，行星状星云都在不断地向外膨胀，膨胀速度约为 10～50 千米/秒。由于不断膨胀，星云物质的密度就会越来越小，最终必将完全消失在广袤无垠的宇宙之中，到那时行星状星云也就寿终正寝了。按照行星状星云的膨胀速度推算，它们的

寿命只有几万年。与人类的寿命相比,几万年已经够长了,但在已有150亿年历史的宇宙中,行星状星云的寿命实在是太短暂了。

行星状星云是类太阳恒星演化到晚期的产物。恒星的主要成分是氢,氢的聚变反应是维持它们辐射数十亿年稳定不变的能量来源。天文学家估计,类太阳恒星可以保持均匀辐射大约100亿年。例如,目前太阳已经在茫茫宇宙中度过了50亿年漫漫岁月,那么,再过50亿年之后,太阳中心部分的氢完全聚变成了氦,太阳核心外围的氢又开始了聚变为氦的反应,并且从里到外逐步扩展。核聚变所产生的强大辐射压力把太阳外层的大气向外推,太阳就像吹气球似地很快膨胀起来。目前太阳的半径是70万千米,到那时会胀到大约7000万千米,半径扩大了100多倍。在膨胀的过程中,太阳外层大气的温度逐渐下降,发出的光也逐渐变为红色,太阳变成了一颗红巨星。

红巨星是不稳定的星,太阳在红巨星阶段最多只能维持10亿年。由于它的辐射压大大降低,远远不能与引力相抗衡,导致恒星坍缩,体积缩小,密度加大,温度升高。在这种高温的条件下,原子核外的电子全部电离,变成赤裸裸的原子核和核外的自由电子,原子核一个挨一个的挤在一起。这样,一颗和太阳差不多大小的恒星就变成和地球差不多大小的密度很高的白矮星了。由于自由电子可以产生巨大的压力来抵抗引力,恒星不再坍缩了,白矮星成为稳定的恒星。红巨星本身向内的引力与向外的辐射压力不平衡,其内部坍缩变成了白矮星。坍缩过程中产生的巨大反冲力导致外层大气向四周逃离。向外逃离的大气会围绕着中心的白矮星形成一个十分美丽的星云,即行星状星云。有关行星状星云形成的理论模型,我们在第六讲中也作过介绍。

质量比太阳大许多的恒星的演化归宿将不是白矮星。当恒星抛掉外层的物质后所留下的质量超过1.4个太阳质量时,引力要比自由电子产生的压力大,恒星就要继续坍缩,直到形成中子星或黑洞为止。曾获诺贝尔物理学奖的著名天文学家钱德拉塞卡首先给出白矮星这个质量上限,所以又称钱德拉塞卡质量上限。

天文学家估计在银河系中共有四五万个行星状星云,但目前人们只

发现了 1 千多个。不过，人们在银河系的近邻星系中也发现了不少这类天体，如大麦哲伦云中有 400 多个，小麦哲伦云中有 200 多个，仙女座大星云中有 300 多个。

3. 超新星遗迹

超新星遗迹是银河系中一类比较特殊的气体星云，它们是由超新星爆发时抛出的物质形成的。超新星爆发是大质量恒星晚期演化的必然过程，这一过程是宇宙中最激烈、最壮观的现象之一，超新星爆发后所遗留下的弥漫星云就叫做超新星遗迹。目前，天文学家已经发现的银河系内的超新星遗迹共有近 200 个，其中包括一部分尚未得到最后确认的。它们大多数呈气壳状，少数类似于蟹状星云为纤维网状。

观测发现，超新星遗迹总是以天空中孤立的强射电源的形式出现，很多超新星遗迹同时还发出很强的 X 射线辐射。天文学家认为，超新星爆发后会形成一个高速旋转的中子星——脉冲星，蟹状星云脉冲星的发现证实了这一点。

金牛座蟹状星云是最著名的超新星遗迹(彩图 27)。1731 年英国业余天文学家贝维斯首先发现了它。1758 年法国的梅西叶把它放在《梅西叶星表》的第一位，因此简称它为 M1。1850 年英国天文学家罗斯将它命名为蟹状星云。

蟹状星云受到了现代天文学家特殊的关注。1921 年天文学家已经发现它在不断向外膨胀。1928 年美国天文学家哈勃首次提出了蟹状星云是 900 年前一个超新星爆发后的产物这个科学的论断。在经过位置、年龄、亮度变化和距离等各方面的考证以后，天文学家确信，蟹状星云就是中国古籍记载的 1054 年“客星”所留下的遗迹。蟹状星云成为天文学家研究大质量恒星晚期演化的一个活样本。

1948 年，天文学家证实蟹状星云发射出很强的射电波。1964 年，天文学家发现 M1 是一个很强的 X 射线源。而且这是人们第一次发现太阳系外的可见光天体也同时是一个 X 射线源。1968 年的空间探测又发现 M1 还是 γ 射线源。同一年又在蟹状星云中心区域探测到射电脉冲

星。1970 年,天文学家又在蟹状星云中心北部观测到一个弱的“喷流”,等等。

有天文学家说“蟹状星云是个包藏在秘密之中的秘密的秘密,解决了一个问题又产生出一个新的问题”。除了太阳之外,没有哪一个天体能像蟹状星云一样,让天文学家获得如此大量的新的信息,并且进一步从中得出如此大量的新理论。1987 年天文学家发现了大麦哲伦云内的超新星 1987A(彩图 28)。像蟹状星云一样,超新星 1987A 也为我们提供了大量的宝贵信息,被人们誉为蟹状星云的双胞胎。

思考和复习题:

1. 你是否观察过不同季节银河在天空中的位置变化? 为什么会有变化?
2. 为什么赫歇尔被尊称为“恒星之父”?
3. 沙利普是怎样证明太阳不在银河系中心的?
4. 银河系中有哪几类天体?
5. 试描述银河系的结构。

第十二讲

纵览大宇宙

在银河系以外，还有许许多多与银河系类似的庞大天体系统，它们被叫做河外星系。20 世纪 20 年代被誉为“星系之父”的美国天文学家哈勃确认了仙女座大星云是银河系之外的天体系统，从此人们的目光从银河系扩展到广阔无垠的宇宙空间，实现了又一次认识上的飞跃。哈勃不仅发现了河外星系，还发现宇宙正在膨胀的证据，为确立现代流行的热大爆炸宇宙模型提供了依据。已知视星等亮于 20 等的河外星系有 2000 万个，亮于 23 等的则有 10 亿个以上。最远的河外星系估计距离可达 150 亿光年，对它们的观测使天文研究的范围扩展到以百亿光年为尺度的广阔空间，并可追溯到百亿年以前发生的事件，成为现代宇宙学的重要支柱。按星系特性河外星系被分为正常星系和活动星系或特殊星系两大类。活动星系和活动星系核是当今最活跃的研究领域。射电星系、赛弗特星系、致密星系、爆发星系和类星体都属于活动星系。河外星系也聚成大大小小的集团，有双重星系、多重星系以至由成百上千个星系组成的星系团。星系团中各个成员之间是由引力而相互联系着。星系、星系团以及这种宇宙中的大尺度结构的形成和演化是宇宙学研究领域正在探索中的热点课题。

一、“宇宙岛”的猜想和“宇宙尺度”大辩论

早在18世纪中叶，学术界就对“星云”的本质进行探讨，到20世纪初期还没有搞清楚。于是导致了一次意义深长的关于“宇宙尺度”的大辩论。辩论的焦点是，天空中的那些云雾状的“星云”究竟是银河系内的天体还是和我们银河系差不多的天体系统。

1. 有关“宇宙岛”的猜想

自从1609年伟大的意大利科学家伽利略发明了天文望远镜之后，人们陆陆续续发现天空中存在许多与恒星不同的如云似雾、形状模糊的亮斑，统称它们为“星云”。18世纪中叶，著名的德国哲学家康德猜想在整个宇宙中存在着无数个与银河系类似的天体系统，他认为，天空中那些云雾状的“星云”很可能就是这样的天体系统，并称他们为“宇宙岛”。康德还指出著名的仙女座大星云就是一个典型的例子。

18世纪下半叶，天文学家威廉·赫歇尔观测了梅西叶星表中的29个星云，发现许多星云都能分解为一颗一颗的恒星，他以为证实了康德的猜想。其实他的望远镜分辨率根本不够高，当时被他分解开的“星云”实际上是一些球状星团。可是没过多久赫歇尔自己就把自己的观点推翻了，因为他又观测到另外一些无论如何也分解不出恒星的星云。因此赫歇尔又提出星云就是一大团气体物质组成的真正的星云，不可能是星系。由于赫歇尔极高的名望，大家都接受了他的观点，并且在很长时间内都没有人怀疑他这个并不正确的观点。

19世纪中叶，英国天文学家罗斯花了20多年的时间建造了一架口径达184厘米的反射望远镜。他通过这架望远镜把更多的星云分解成了单个的恒星，由此得出了一个与赫歇尔完全不同的结论：只要望远镜足够大，星云都可以分解成恒星，所有的星云都是河外星系。实际上，赫歇尔和罗斯对星云本质的认识，都是不全面的。

19世纪60年代，英国天文学家哈根斯(1824—1910)在自己的望远

镜上装上分光仪，开始观测研究恒星和星云的光谱。他发现恒星的光谱与气体的光谱是不同的，恒星的光谱是连续光谱背景上叠加了许多暗的吸收线，而稀薄气体的光谱却不存在连续背景和暗线，只有一些明亮的光谱线。因此哈根斯想通过分光方法来揭开星云本质，解决这个长期困扰着人们的难题。哈根斯发现多数星云的光谱与气体光谱一样，是明线光谱，而也有个别星云的光谱却像恒星一样是连续的。可惜他没有重视这个重要的观测结果，反而高兴地认为自己已经认清了星云的本质，片面地认为所有的星云都是一团发光气体。

2. 有关“宇宙尺度”的大辩论

英国天文学家哈根斯虽然没能解决星云的本质问题，但是他所开创的使用分光方法研究恒星和星云，却是一种行之有效的方法。一些天文学家使用这种方法进一步观测和研究之后，发现被康德称为“宇宙岛”的这些云雾状天体其实并不全都是同一类天体。其中有一类是一些由气体和尘埃构成的、位于银河系以内的真正的气体星云，统称为“银河星云”。而另一类云雾状天体实际上却是由许多恒星密集在一起构成的恒星集团，它们往往具有旋涡状结构，因而又称之为“旋涡星云”。仙女座大星云就是一个十分典型的旋涡星云。

旋涡星云究竟是一种什么样的天体系统？它们是银河系以内的天体还是银河系以外的天体？这个问题令天文学家十分费解，意见不一，直到20世纪初期，还是分裂为泾渭分明的两大派。一派认为旋涡星云也都是银河系以内的天体。另一派则认为旋涡星云不是银河系以内的天体，而是像我们自己的银河系那样的“宇宙岛”。

1920年4月26日，美国国家科学院为这个问题专门举行了一次题为“宇宙尺度”的辩论会，辩论的内容是银河系的大小和旋涡星云的真相。参加辩论的双方代表都是当时赫赫有名的天文学家，一方是曾对银河系结构做出了正确解释的沙普利，另一方是在测定天体距离方面颇有成就的柯蒂斯。柯蒂斯认为旋涡星云是河外星系，他根据仙女座大星云中新星的亮度估计了它的距离，约为100万光年，远远大于银河系的直

径。因此推断“仙女座大星云作为银河系外的星系,展示了比我们原先所想像的更为宏大的宇宙。”沙普利坚持认为“旋涡星云与其它星云一样都是银河系的成员。”他的证据是一位荷兰天文学家范玛南所提供的观测结果:旋涡星云的距离只有数千光年,都在银河系的范围以内。范玛南的观测结果后来被哈勃证实是错误的。当时辩论双方各持己见,谁也拿不出足够的理由将对方说服。旋涡星云究竟是一种什么样的天体,成为举世瞩目的难解之谜。

二、哈勃与河外星系的发现

肉眼可见的仙女座大星云是银河系内的天体呢,还是银河系外的天体系统?美国天文学家哈勃以无可辩驳的观测事实和研究结果给出正确的回答,很快获得公认。

1. 星系之父哈勃

就在许多天文学家为旋涡星云的本质问题而煞费苦心的时候,有一位风华正茂、智力超群的美国年轻天文学家开始注意这个困惑大家多年的难题。他就是埃德温·鲍威尔·哈勃(1889—1953)。

哈勃是一位十分杰出的天文学家,他的一生充满了传奇色彩。他



图 12-1　星系之父哈勃

1889年11月20日出生在密苏里州一个律师家庭里。在芝加哥大学学习期间，接受了著名天文学家海耳的建议，开始学习天文学，并获得天文学学士学位。后来因获得罗兹奖学金而前往英国牛津大学改学法学。1913年回到美国，开了一家律师事务所。他对律师职业缺乏热情，一年之后投奔到芝加哥大学隶属的叶凯士天文台。1917年他完成了“暗弱星云的照相研究”的学位论文而获博士学位。

年轻的哈勃在天文学观测和研究方面显示出的才华引起了时任威尔逊山天文台台长的海耳的注意。哈勃接受了海耳的邀请准备到威尔逊山天文台工作。然而，由于第一次世界大战的爆发，哈勃还未来得及登上威尔逊山便应征入伍做了一名陆军士兵。战争结束之后1919年10月才返回美国，这时已经30岁了。来到威尔逊山天文台，哈勃如鱼得水，威尔逊山上口径2.54米的巨型望远镜帮助他在天文学事业上取得了极其辉煌的成就。

2. 造父变星和遥远天体距离的测定

要确定旋涡星云的本质，首先依赖于距离的测定。距离是天文学上最重要的参数之一。望远镜的观测只能给出天体在天球上的投影的位置。不知道天体的距离就不能确定天体在空间中的真实分布、运动速度和发射电磁波的真实强度，也不可能测量出天体的大小。

造父变星是很著名的一类变星。中国古代用传说中的驾车能手造父来命名仙王座δ和它周围的几颗星，其中仙王座δ称造父一，与它同类型的变星都被称为造父变星。造父变星的体积时而膨胀，时而收缩，呈现周期性。恒星表面积周期性的变化导致光度周期性变化。造父一变星的亮度极小时为4.4等，极大时为3.7等。周期为5天8小时47分28秒。造父变星的光变周期各不相等，大多在1天到50天之间，而以5天到6天的为最多。造父变星的最重要特性是它们的绝对星等与光变周期之间存在着一种确定的关系，绝对星等相当于光度，光度越大的光变周期越长(见图12-2)。同一个星系或星团内的各个造父变星与我们之间的距离基本是一样的。所以，同一个星系中的造父变星的视星等可

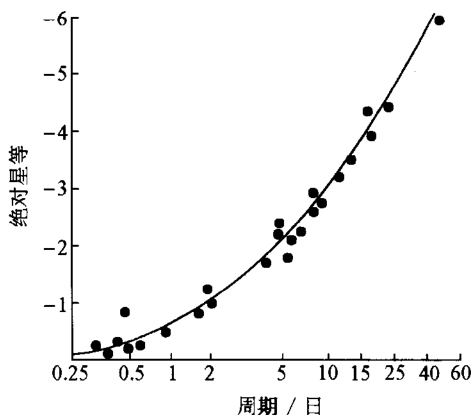


图 12-2 造父变星的周光关系

以代表它们的绝对星等。这样就可以得到造父变星绝对星等(光度)和周期之间的关系。沙普利利用造父变星的周光关系测量银河系中的球状星团的距离而得到一个比较正确的银河系结构的模型。

3. 揭开旋涡星云之谜

从 1922 年起,哈勃正式投入了对旋涡星云的观测和研究。柯蒂斯和沙普利的辩论给哈勃很大的启发。他想到,解决问题的关键是要测量出仙女座大星云的距离。

早期用小型望远镜拍摄仙女座大星云的照片,模糊不清(图 12-3),而现代大型望远镜拍的照片如图 12-4 所示,则可辨认出许多恒星。1923 年,哈勃使用当时世界上最大的威尔逊山天文台 2.54 米的巨型反射望远镜拍摄了一批高清晰度的旋涡星云照片。望远镜惊人的分辨本领使照片上仙女座大星云(M31)的外围已被分解为恒星,从这些恒星中他找到了第一颗造父变星。第二年,他又从 M31 和三角座旋涡星云(M33)中辨认出许多造父变星。他用"造父变星测距法"测出了这两个旋涡星云的距离,计算出 M31 和 M33 的距离都约为 90 万光年,而当时已知银河系的直径为 10 万光年。由此哈勃确认 M31 和 M33 都是远在银河系以外的独立的星系。

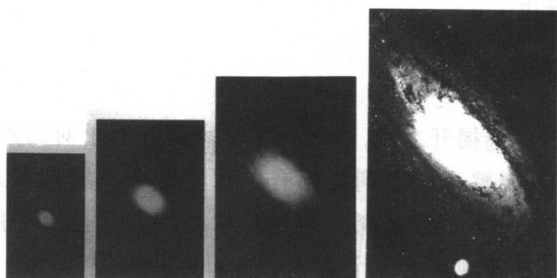


图 12-3　口径不同望远镜所获得的仙女座大星云照片比较



图 12-4　现代大型天文望远镜拍摄的仙女座大星云

1924 年底，美国天文学会和美国科学促进会在华盛顿召开的会议上宣布了哈勃对于旋涡星云的研究结果。哈勃本人没有出席这次大会，但当他的论文刚一读完，全体在场的天文学家马上意识到旷日持久的关于旋涡星云本质问题的大辩论应该画上句号了。美国科学促进会给哈勃颁发了最佳论文奖。

1925 年，哈勃又用"造父变星测距法"测定了人马座星云 NGC6822 的距离，证实了该旋涡星云也是一个河外星系。同年，这一成果以"NGC6822，一个遥远的恒星系统"为题发表在美国《天体物理学报》上。哈勃的这些工作，翻开了人类研究大宇宙的新的一页。从此人类探索宇宙的视野从银河系又扩展到了河外星系。一门新的天文学分支学科——星系

天文学随之诞生了。

4. 哈勃定律

旋涡星云之谜揭开之后,许多天文学家都开始了对河外星系的观测和研究,他们发现整个天空到处都有星系的踪迹。哈勃本人从20年代后期开始,和他的助手赫马森一起在威尔逊山天文台上利用2.54米的望远镜全力以赴地观测着一个又一个遥远的星系。

在银河系的恒星中,有离我们而去的,也有向我们而来的,所以有的恒星的光谱线有红移,有的恒星则有紫移。河外星系的情况怎么样呢?到1929年为止,哈勃测出了20多个河外星系的光谱和距离。他发现所有星系的光谱线只有红移而没有紫移,红移量都比银河系中恒星的红移量大。而且河外星系的距离越远,其谱线红移也越大。

红移是由星系相对我们视线方向运动的多普勒效应产生的。由于天体远离我们而去,天体上发出的波长很短的光谱线,到达地球上时,却变成了波长很长的光谱线,光谱线向红端移动了,这就是天体的谱线红移。红移越大说明它们远离我们而去的速度也越大。光谱线的红移量 z 与距离 D 成正比:

$$z=(\lambda-\lambda_e)/\lambda_e \approx (H_0/c)D=v/c,$$

式中 λ_e 是在地球上实验室中测定的某条谱线的波长,λ 是实际观测到的星系中的同一条谱线的波长。λ_e 和 λ 的差别越大,红移值也越大。式中的 D 表示河外星系的距离,v 为视向速度,也就是沿着观测者视线方向的运动速度,H_0 为哈勃常数,c 为光速。由此可以得到下面的关系式

$$v \approx H_0 D,$$

这个关系式就是著名的哈勃定律,也称哈勃关系。哈勃常数大约是75千米/(秒·百万秒差距),秒差距是距离的单位。哈勃常数是一个目前还没有得到最终确定的值。哈勃定律表明整个宇宙都处于膨胀的状态。哈勃将他的这一重要研究成果写在"河外星系的距离与视向速度的关系"一文中,很快就得到了天文界的公认。

后来,人们常用测红移的方法来测定河外星系到我们的距离。哈勃

定律的确立使人类的宇宙观念发生了深刻的变化。以前人们认为宇宙在整体上是静止的，而从此人们认识到了宇宙膨胀的壮观图景：宇宙各部分正在彼此远离，它们互相远离的速率随着它们之间的距离的增加而增大(图 12-5)。

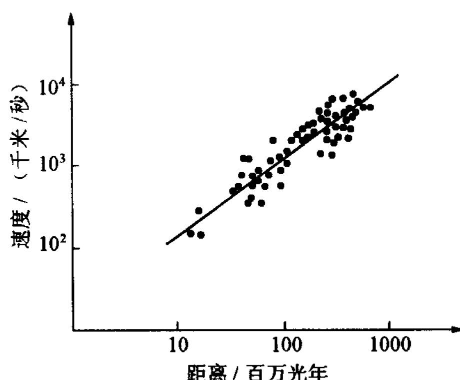


图 12-5　星系退行速度与距离的关系

三、河外星系揽胜

在银河系以外，有许许多多与银河系类似的河外星系。按形态它们被分为旋涡星系、椭圆星系和不规则星系，按性质它们又被分为正常星系和特殊星系。

1. 河外星系有多少?

自从人们知道有河外星系存在之后，这个问题就提到了日程上。1995 年 12 月哈勃空间望远镜拍到一张由 276 幅画面拼接成的非常精彩的宇宙深处达 130 亿光年的照片，这张照片的视场只有月球直径的 1/3，照片上只有寥寥几颗银河系内的恒星，遥远的河外星系却达 1500 个。天文学家根据哈勃空间望远镜拍摄的这幅照片，估计河外星系的总数达 2000 亿。最远的河外星系估计可达 150 亿光年，对它们的观测使天文研

究的范围扩展到以百亿光年为尺度的广阔空间，并可追溯到百亿年以前发生的事件，成为现代宇宙学的重要支柱。

2. 哈勃星系分类法

自从旋涡星云的秘密被揭开之后，人们发现的河外星系越来越多。它们形态不同，特点各异，显得十分杂乱无章。哈勃在分析研究了大量的观测资料以后，于 1926 年提出了给星系分类的方案。以后人们就称这个方案为哈勃星系分类法，并且一直沿用至今(图 12-6)。

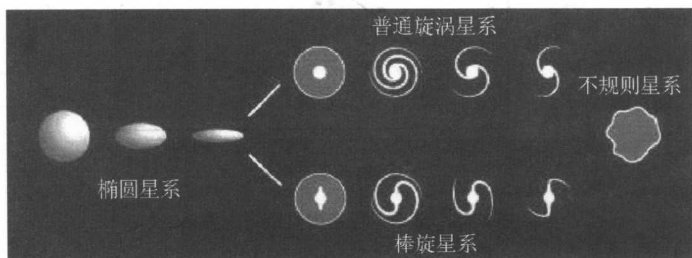


图 12-6 哈勃星系分类示意图

按照哈勃星系分类法，星系按其形态的不同，分为椭圆星系、旋涡星系和不规则星系三大类。椭圆星系用英文字母 E 表示，旋涡星系用字母 S 表示，不规则星系的符号是 Irr。椭圆星系根据其视扁度还可细分为 E0，E1……E7 等 8 个小类，E0 为球形，E7 是扁度最大的椭圆。旋涡星系分为中央有棒状结构的棒旋星系(SB)和无棒状结构的正常旋涡星系(S)两类。这两类又细分 a，b，c 三种。SBa 和 Sa 星系有很大、很亮的中央核球和缠绕很紧的旋臂。SBc 和 Sc 星系则是具有较小核球和散开旋臂的结构。S0 则是一种介于椭圆星系和旋涡星系之间的过渡状态的星系(见图 12-7)。哈勃将各种星系分门别类地画在一张图上，有趣的现象出现了，这个图的形状非常像一个做物理实验用的音叉，因此人们常称之为星系分类的音叉图，或者干脆就叫它星系的音叉图。

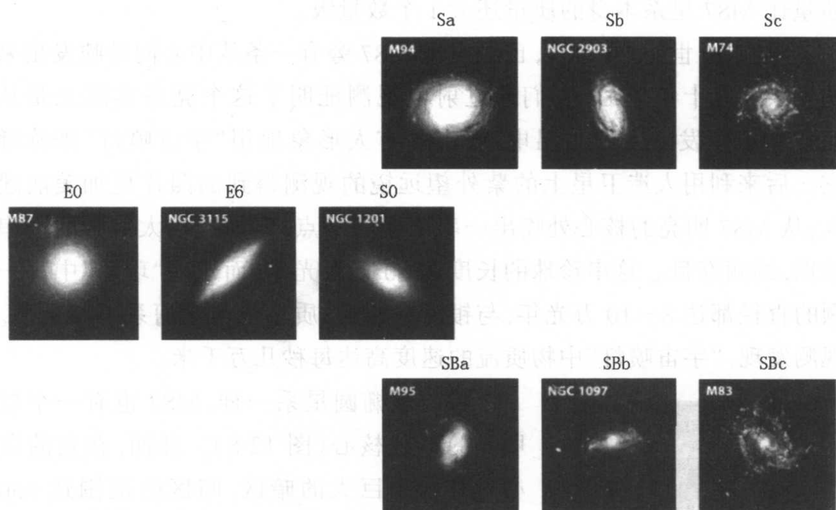


图 12-7　星系分类的实例

3. 椭圆星系

椭圆星系的形状看起来是圆球形或椭球形，没有旋涡结构，中间部分较明亮，四周暗淡一些。椭圆星系的数目不算多，仅占河外星系总数的 17%。宇宙中质量最大的和质量最小的河外星系都是椭圆星系。质量大的可大到 10^{13}倍太阳质量，最小的则只有 10^{6} 倍太阳质量，两者相差 10^{7} 倍。椭圆星系主要由老年恒星组成。

最著名的椭圆星系是 M87，也叫 NGC4486，位于室女座 ε 方向。距离我们 4400 万光年，比仙女座大星云远了约 20 倍。M87 是目前已知的质量最大的星系，大约是银河系质量的 200 倍。利用射电观测手段测出它的直径为 23 万光年，光学大望远镜测出的结果是 65 万光年，而 X 射线观测却测出它的直径达 80 万光年。1982 年美国发射的"高能天文台"2 号卫星发现 M87 的星系晕直径达 260 万光年，竟然比银河系到仙女座大星云的距离还大，令人不可思议。这个晕的光度虽然不强，但 X 射线辐射却极强。估计晕中的物质质量达 10^{14}倍太阳质量，也就是说，它的

质量比 M87 星系本身的质量还大 1 个数量级。

早在 20 世纪 20 年代，已经发现 M87 旁有一条从中心向外喷发出来的亮条。几十年以后，人们通过射电观测证明了这个亮条实际上是从 M87 中心喷发出来的高温电离气体，有人形象地用“宇宙喷灯”来称呼它。后来利用人造卫星上的紫外望远镜的观测得到的照片更加美丽迷人：从 M87 明亮的核心处喷出一串明亮的结点，宛如挂在太空中的一串珍珠，绚丽夺目。这串珍珠的长度达 80 多万光年，而这些“珍珠”中每一颗的直径都达 8～10 万光年，与银河系相当；质量也与银河系不相上下。观测发现，“宇宙喷灯”中物质流的速度高达每秒几万千米。



图 12-8　椭圆星系 M87

像一般椭圆星系一样，M87 也有一个较明亮的球状核心(图 12-8)。然而，在它的核心里有一个巨大的暗区，暗区的范围达 650 光年，其中所包含的物质的质量高达 10^9 倍以上太阳质量，这与整个大麦哲伦云星系的质量不相上下。一些天文学家分别用蓝、黄、红三色光仔细研究了这一神秘的暗区，发现里面还有一个极为明亮的小核心，其大小只有 5 光年左右，但那儿很不平静，时常有各种激烈的活动现象发生，因此时常能观测到突如其来的爆发，大量的物质抛射等等。有些天文学家猜想小核心处有一个质量高达 10^9 倍太阳质量的星系级大黑洞。

4．旋涡星系

旋涡星系按形态可分为普通旋涡星系和棒旋星系。普通旋涡星系一般都有一个比较明亮的、椭圆形的中央核区，其外部为一薄的圆盘，称为星系盘。从核区向外伸出几条盘旋着的旋臂加在星系盘上。在同一个星系中，旋臂或沿顺时针或沿逆时针方向延伸出去。在旋臂上物质比较稠密，有比较多的气体和尘埃，因此成为孕育恒星的场所，很多恒星在

这里诞生。棒旋星系的形状像一根棍棒，旋臂从棒的两端伸出，旋转时棒形结构以相同的角速度旋转。NGC 1365 是一个形态上很典型的棒旋星系（图 12-9）。



图 12-9　棒旋星系 NGC 1365

旋涡星系是河外星系中数量最多、形态最美的。望远镜越大，能够看见的越多，也越清晰。它们虽然各具不同的形状和亮度，但都展现出明亮的核心，弯曲的旋臂以及旋臂上一些突出的结点和斑点。在众多的旋涡星系中，仙女座大星云 M31（NGC224）是最明亮的，是我们单凭肉眼就可以看见的最遥远的天体。由于它是第一个被证认为银河系外的星系，因而格外有名。因为它不是正面对着我们，旋臂的特征不很明显。

1993 年哈勃空间望远镜拍到的 M31 核心部分的照片，显示出它有两个相距仅 5 光年的核（图 12-10）。两个核内分别都包含有数百万颗恒星。天文学家估计这是几十亿年前有一个小星系闯入了仙女座大星云，经过引力的吸引作用形成了两个核。

三角座中的 M33 也是一个典型的旋涡星系，是 1764 年由法国天文学家梅西叶发现的。图 12-11 是 M33 光学波段的照片，彩图 30 是射电望远镜在 21 厘米波长上（中性氢气体）的观测结果。它没有 M31 那样明亮，中心部分的目视星等只有 6.7 等。M33 的正面朝向地球，非常有利于我们的观测。它是一个比较小的旋涡星系，大约是银河系的2/3，质量

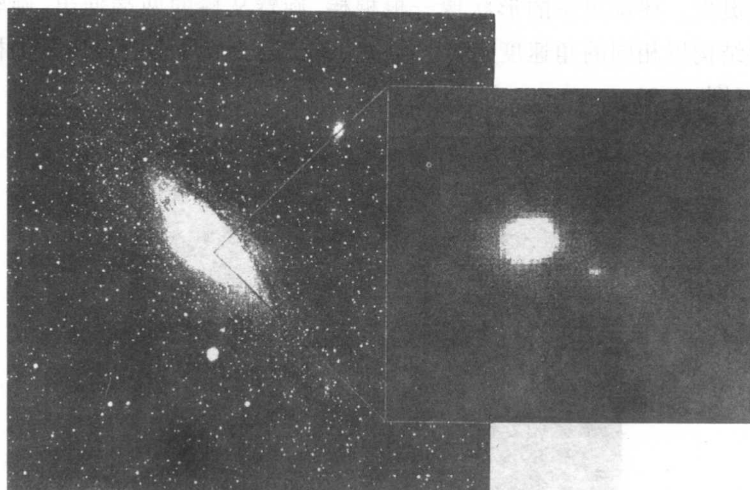


图 12-10　M31 的核心显示出有两个核

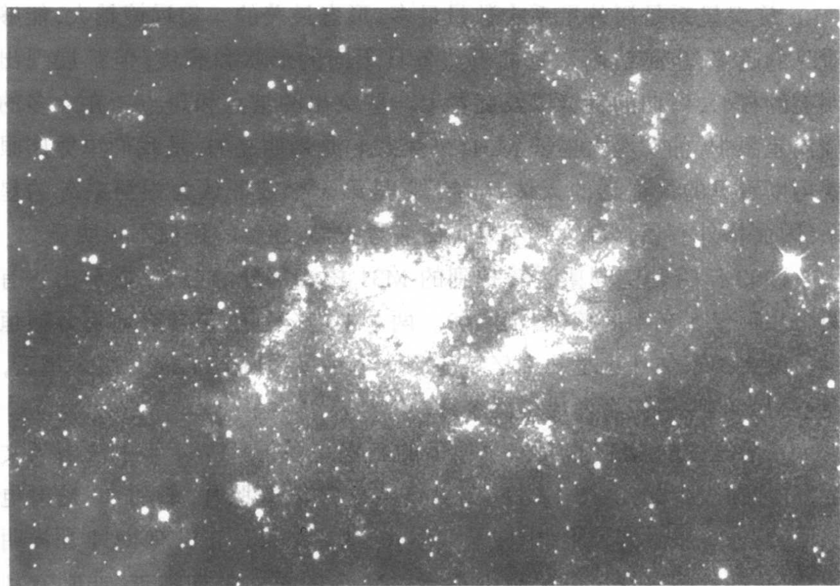


图 12-11　光学望远镜拍摄的三角座 M33

仅为银河系的4%，距离为235万光年。旋臂中有大量的恒星和气体，而星系核心区域则没有那么多恒星和气体。它的核心发出强X射线源，这可能是那儿隐藏着一个黑洞的征兆。

欧南台甚大望远镜(VLT)拍摄的旋涡星系NGC1232更具典型性，明亮的核球和舒展开来的旋臂，十分美丽动人(见彩图29)。

5. 不规则星系

不规则星系占河外星系的极少数，通过望远镜去看，它们只是一些没有一定形状的亮斑，没有核球，也没有旋臂。离银河系最近的大麦哲伦云和小麦哲伦云就属于这类不规则星系。它们相距很近，又很明亮。16世纪葡萄牙著名的航海家麦哲伦在环绕地球航行的时候首先发现了它们，因此分别命名为大、小麦哲伦云(图12-12)。

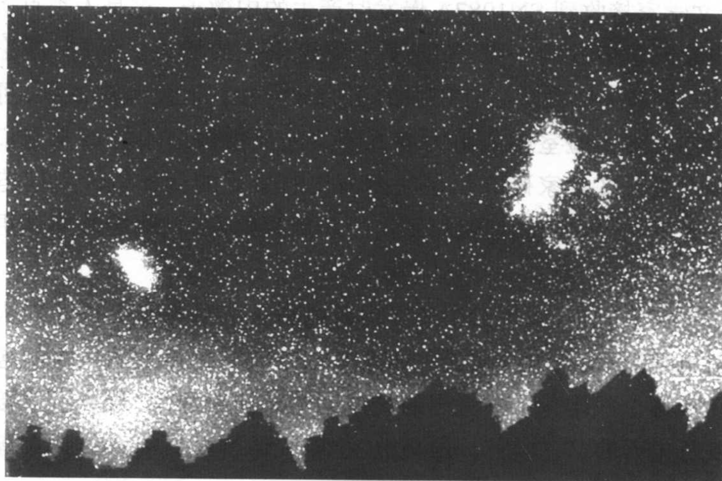


图12-12　大麦哲伦云(右)和小麦哲伦云(左)

大麦云和小麦云都位于南天极附近，距离南天极仅仅20度左右，北半球的人们一般都见不到它们。大麦云位于剑鱼与山案两个星座的交界处，跨越了两个星座。它的直径约3万光年，质量约为10^{10}个太阳质量。小麦云位于杜鹃座，直径约1万光年，质量约为20×10^{9}个太阳质

量。大麦云距离我们约 16 万光年，小麦云距离我们大约 19 万光年，在广漠无垠的宇宙中，它们算是我们银河系一衣带水的近邻了。事实上，它们和银河系一起组成了一个“三重星系”。大、小麦云都比银河系小得多，因此，它们也算是银河系的两个“伴星系”。

在大小麦云中发现了许许多多与银河系中相同的天体，有像太阳一样的普通恒星，有巨星、超巨星，各种各样的变星，致密的中子星，造父变星等；还有疏散星团、球状星团、行星状星云、发射星云等等。1987 年 2 月 23 日晚，天文学家发现在大麦云中出现了一颗超新星，命名为 SN1987A。这是人类发明了天文望远镜以后近 400 年来出现的最亮的一颗超新星，肉眼可见，引起了天文界的极大重视。天文学家们在各个波段对它进行了长期的监测，获得了许多十分宝贵的信息，证明了恒星演化理论的一些基本预言，同时也发现了一些始料未及的新问题。例如，天文学家接收到 SN1987A 爆发时产生的中微子，这是人类首次观测到来自超新星爆发的中微子，证实了理论研究的成果。另外，理论研究还表明，超新星爆发时会有较强的引力波发生，但没有观测到，可能是因为目前地球实验室中的引力波探测器的灵敏度还不能察觉它们。超新星爆发是天文学家研究恒星晚期演化的最好的活样板。人们迫切期待着能在近期内看到我们银河系内的超新星爆发，以便能够揭开更多的宇宙之谜。

像银河系一样，大麦云中还发出射电和 X 射线辐射。通过对大小麦云的射电观测，发现大小麦云外面还有一个共同的很大的气体层包围着它们。从这个气体包层中流出的气体一直流向银河系，形成了连接银河系与麦哲伦云的“气体桥”。很显然，这座气体桥是银河系的强大潮汐力把气体从大小麦云中拉出来而形成的。

6. 不平静的特殊星系

哈勃给星系分成旋涡星系、椭圆星系和不规则星系几类，这些都属于正常星系，它们辐射的主要能量都集中在可见光波段。后来，人们通过观测又发现，除了这些正常星系之外，宇宙中还有一些性能上很特殊

的星系，统称为特殊星系。特殊星系的名目繁多，表现各异，非常复杂。

第一种特殊星系是射电星系。它们在射电波段的辐射功率特别强，不仅比本身的光学波段的辐射功率大得多，而且也比所有正常星系的射电辐射强很多。天鹅座 A 是第一个被发现的射电星系，也是最强的河外射电源，比银河系的射电辐射功率强几百万倍。射电星系按照它们的大小和形态，可以分为致密型、双源型和头尾型等几个次型。巨椭圆星系 M87 也是一个典型的射电致密星系，著名的射电源天鹅座 A 则是一个典型的射电双源星系。

第二种特殊星系为赛弗特星系，是一类特殊的旋涡星系，因 1943 年美国天文学家赛弗特发现而得名。彩图 31 是一个很典型的赛弗特星系。这类星系最重要的特点是具有十分明亮而又不大的恒星状核，有较强的光度和很蓝的连续谱，光谱中有很宽的高电离气体发射线，谱线红移比一般星系大。赛弗特星系又分为两类，一类与类星体相似，人们常称它们为“微类星体”，另一类大多没有完整的旋臂，而有明显的喷射物，很可能是激烈爆炸后的产物。

第三种特殊星系是致密星系。直径很小，看起来像恒星，而亮度和光谱红移却非常大。这类星系比其它星系的活动都更激烈。致密星系又可分为一般致密、中等致密、甚致密和极端致密等四类。目前已发现的致密星系比赛弗特星系还多许多。

第四种特殊星系是具有强烈爆发的爆发星系。最著名的是大熊座的不规则星系 M82。光学观测发现那里正在大量地抛出气体，速度高达 1000 千米/秒。天文学家估计 150 万年以前那里曾经发生过大爆发，抛出的物质相当于几百万个太阳质量。

第五种特殊星系具有很强的紫外连续辐射，称为马卡良星系，是由苏联天文学家马卡良于 20 世纪六七十年代发现的。它又分为两个次型，一种是亮核型，明亮的星系核本身就是紫外连续源，多为旋涡星系；另一类是弥漫型，紫外连续源分散在整个星系内，一般为暗弱的不规则星系。

四、多重星系、星系团和超星系团

恒星喜欢“群居”，它们中大部分都是双星、多重星或者星团，“孤家寡人”比较少。星系更是如此。目前已知的几千亿个河外星系，它们形成双星系、多重星系、星系群、星系团乃至超星系团。

1. 多重星系和星系群

我们的银河系与它的两个近邻大小麦哲伦云，实际上就已是一个非常典型的三重星系。近年来所发现银河系的伴星系又增加了 9 个，银河系变成了处于十二重星系之中的星系。除了大小麦云之外，另外 9 个都是不太亮，有的甚至相当暗的小椭圆星系。它们是玉夫、天炉、狮子Ⅰ、狮子Ⅱ、天龙、小熊、比邻、船底和六分仪星系。六分仪星系直到 1989 年才被发现，它太暗了，星系里没有亮于 20 等的恒星。

像银河系一样，仙女星系 M31 是一个九重星系中的老大哥。围绕着它的 8 个伴星系也都比较小，其中有的是非常小的椭圆星系。在这些伴星系中，M32 和 NGC205 是其中两个最亮的椭圆星系，视星等都是 8.2 等，通过小望远镜拍摄的仙女星系的照片上，就能清楚地看见它们。NGC147 和 NGC185 稍暗一些，但质量大小均与前两个伴星系相当。另外 4 个伴星系又小又暗，距离仙女座 M31 又很近，是 20 世纪 70 年代才证认出来的。

十来个星系聚在一起组成了多重星系。几个多重星系聚在一起，就组成了更高一层次的星系群。包括我们的银河系在内的星系群叫做本星系群。它以银河系和仙女星系的质量中心为中心，直径范围大约 2 兆秒差距(326 万光年)，包含大约 40 多个成员星系。这 40 多个星系中比较大的三个都是旋涡星系，仙女座 M31 最大，银河系其次，三角座 M33 第三，这三个星系发出的光和其它各种辐射占本星系群总辐射的 91% 以上，其余比较小的星系大部分是椭圆星系和不规则星系。本星系群的总质量估计为 5×10^{11}个太阳质量，相当于 25 个银河系的质量。

在飞马座方向，距离地球 2.7 亿光年的距离上有一个五重星系，是法国天文学家施特芬在 1877 年发现的。图 12-13 是施特芬五重星系的照片。这五个星系分别是 NGC7317, NGC7318A, NGC7318B, NGC7319 和 NGC7320。由于星系间的激烈作用，在星系间产生了由几百万颗比较年轻的恒星组成的星团。



图 12-13　施特芬五重星系

2. 星系团和超星系团

比星系群更大的星系集团，就是星系团了。成员达到多少个，直径达到多大的星系集团才能称做星系团，目前还没有一个统一的标准。一般认为星系团的成员应该比星系群多得多，达到成千上万，直径应该在 5 兆秒差距左右，但也有成员较少的所谓"贫星系团"。重要的一点是看各成员星系间的力学联系，以及星系团的整体运动。本星系群很可能就是一个很小的星系团，不过人们并没叫它本星系团。

室女座星系团是距离我们最近的一个星系团。估计距离为 16 兆～

19 兆秒差距，包括成员星系约 2500 个，其中 2/3 为旋涡星系，但其中心却是在著名的超巨椭圆星系 M87 附近。

后发座星系团也是一个著名的星系团。它距我们约110 兆～140 兆秒差距，包含的成员星系多达 1 万多个。

半人马座星系团是南半天球最著名的星系团，目前已知成员星系不到 1 千，可能还有不少成员星系被银河系中心和银盘遮挡使我们无法看到。

飞马座星系团因其成员星系分布比一般星系密集几万倍而著称。

总之，目前已经确认的星系团有上万个。星系团的形态有比较对称的“规则”型和不对称的“不规则”型。后发座星系团是前者的代表，室女座星系团则是后者的代表。

比星系团更大的天体系统是由若干个星系团组成的超星系团。包括本星系群在内的超星系团叫做“本超星系团”，它的成员还有室女星系团、大熊星系团以及其它一些小星系团，其中心在室女星系团附近。估计银河系绕本超星系团中心转动一周的时间长达 1000 亿年。

宇宙中至少有 50 个左右的超星系团，离我们较近的有武仙超星系团、北冕超星系团、巨蛇-室女超星系团等。

五、星系碰撞和星系演化

天文学中将有些处于引力不稳定状态下，由于引力的作用互相干扰而破坏了正常形态的一对星系或多重星系称为互扰星系。星系之间的相互吸引、碰撞，加速了星系的演化，也产生出多种多样奇异美丽的天象。

1. 几个典型的互扰星系

猎犬座的边缘，距离北斗七星斗柄不远处有一个著名的河外星系 M51。它的视星等为 9 等，视大小为 10′×5′，它的实际大小还不到银河系的一半。M51 是第一个被观测到具有旋涡结构的河外星系。1845

年，英国天文学家罗斯用他的180厘米反射望远镜首次发现了M51的旋涡结构。由于当时人们还没有认识到河外星系的存在，所以就叫它猎犬座旋涡星云。M51虽然不算太亮，但是它却以正面对着我们，通过口径15厘米的望远镜我们就可以欣赏到它的旋涡结构，它的核心明亮且呈圆球，旋臂暗淡却很清晰。在它的上方有一个较小的伴星系NGC5195。它的结构受M51的引力作用而发生了畸变。M51靠近NGC5195的旋臂，也因受伴星系的强烈扰动作用而大大偏离了正常位置，直奔伴星系而去，形成了连接它们的物质桥。天文学家戏称M51为带孩子的星系(图12-14)。

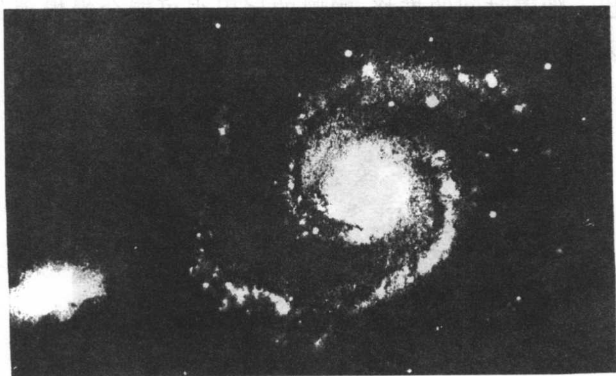


图12-14　带孩子的星系——M51

“天线星系”和“车轮星系”是两种更典型的互扰星系。它们都是两个星系经过激烈的碰撞以后形成的极为精彩的天象。“车轮星系”是由一个较大的和一个较小的星系碰撞而形成的。小星系碰上大星系，增加了大星系的引力，将大星系周围的恒星吸引到星系中心。当小星系远离大星系时，大星系的引力骤减，原先被吸引到星系中心的那些恒星又四散离去，形成美丽的车轮状的光环(见彩图32)。NGC4038和NGC4039是宇宙太空中一对著名的“天线星系”(见彩图33)。两个星系由于碰撞而“长出”的两条细长、弯曲的“天线”又酷似昆虫的一对触角。哈勃空间望远镜拍摄的高清晰度的照片，展现出两个星系碰撞的壮观景象。

“蝌蚪星系”和“老鼠星系”是天文学家根据照片中显示出的天体形

态而作的形象化命名。2002年4月美国宇航局公布的哈勃空间望远镜新的一组照片中就有它们。可爱的“老鼠”实际上也是一对旋涡星系,距地球3亿光年的NGC4676a和NGC4676b,两个星系互相作用,分别拖着由恒星和气体组成的长尾,好像两只老鼠正在嬉戏玩耍(图12-15)。最后可能会变为一个椭圆星系。而“蝌蚪”则是一个距离地球4.2亿光年的星系——天龙座UGC10214,它以几千个星系为背景,拖着一条由恒星组成的“尾巴”,酷似一尾游动着的蝌蚪(图12-16)。这个星系的长尾巴是怎么形成的?目前天文学家尚未得到统一的认识。但是有一点是没有疑问的,那就是它肯定是受到了其它星系的强烈扰动才长出了这只长尾巴。随着时间的推移,蝌蚪的尾巴很可能会慢慢消失,尾巴中的那些星团则可能会聚集成小型星系。



图12-15 老鼠星系



图12-16 蝌蚪星系

彩图 34 显示的是大犬座中的一对互扰星系。两星系接壤处，在大星系 NGC2207 的拖拉作用下，小星系 IC2163 已经产生了变形。到一定的时候，星系之间的这种相互拉近的力量将会足够大，以致数十亿年之后，它们就会合并成一个星系。

宇宙中类似这样的互扰星系还有很多。几十年前曾有天文学家编过一套互扰星系的图和表，表中载有 1800 个互扰星系。

2．星系的碰撞

星系之间相距都很远，为什么星系互相遭遇的事件会如此之多呢？研究表明，恒星之间相撞的可能性极少，因为恒星的平均直径为 10^6 千米，而恒星之间的平均距离为 6.46×10^{13}千米。恒星之间的距离是恒星直径的足足 6000 多万倍。而星系的情况却与恒星不同。星系很大，星系之间的距离却比星系本身的尺度大不了太多。例如，我们银河系与仙女座大星云相距 220 万光年，而银河系的直径为 10 万光年，仙女座大星云的直径 16 万光年，星系之间距离仅仅是它们直径的十几倍到二十几倍。大、小麦云之间的距离更近，仅仅是大麦云直径的 2 倍多。宇宙中全部星系平均起来，星系间距离顶多只有星系直径的 100 倍。

因此，星系之间的相互吸引、碰撞就不是十分罕见的了。天文学家估计，宇宙中大约有 15% 的星系都经历过类似的事件。还有人预计 25 亿年之后，银河系与仙女座大星云也会发生碰撞，因为目前它们正在逐步靠拢。两星系相互碰撞的过程，并不像 1994 年我们观测到的彗星撞击木星造成彗星香消玉殒那样的惨烈。两星系相遇并不会导致两个星系中的恒星相互碰撞，这与两群蜜蜂相遇时的情况类似，两群蜂互相穿越，但并没有蜜蜂相撞。不过，一些恒星往往会在引力的作用下，改变了自己原来在星系中的位置或者是运行方向。体积巨大的星际物质和气体星云在引力的作用下更容易改变自己原来的位置和运行方向，还会因互相挤压，使物质密度骤然增加，进而催发一批新的恒星诞生。

两星系相撞的结果往往是质量较大的星系将质量较小的星系“吃掉”，合并成一个更大一些的星系。当然这个过程是漫长的，长达几十亿

年之久。有时,两个椭圆星系相撞会变成两个旋涡星系,有时两个旋涡星系相撞以后也会合并为一个椭圆星系。究竟相撞的后果如何,由多种因素决定,如两星系原来的大小比例,各自的速度、相撞的角度、撞击的方式和部位,等等。

3. 星系的起源和演化

哈勃当年在进行星系分类的时候,曾将椭圆星系称为早型星系,旋涡星系和不规则星系称为晚型星系。早晚之分是想说明星系的年龄,但是他并没有给出什么根据。后来的观测发现,旋涡星系的颜色发蓝,原因是旋臂上有很多蓝色的恒星。年轻恒星发出的光偏蓝,因此旋涡星系可能是年轻的星系。椭圆星系可能是在旋涡星系的旋臂逐渐消失后形成的,因此椭圆星系的年龄可能是比较老的。恰好与哈勃的估计相反。

然而,旋涡星系就一定都比椭圆星系更年轻吗?这个结论也遇到了挑战,因为人们在研究星系碰撞时发现不仅两个旋涡星系碰撞后可以合并成一个椭圆星系,而且两个椭圆星系碰撞后也可能会变成两个旋涡星系。

通过星系碰撞现象的观测研究以后,人们认为,星系世界中存在的那一批超巨型椭圆星系,是来自于它们吞食了小星系以后逐渐变大而成的。事实上确实发现有些超巨型椭圆星系中有一些小而亮的斑点,可能就是它们吞食的小星系残存的核。那些质量较小的矮椭圆星系,很可能是在宇宙大爆炸的初期自然形成的老年星系。在矮椭圆星系中发现有许多老年恒星这一事实支持了这一观点。

按照大爆炸宇宙学说,星系是从大爆炸后10^{16}秒时开始形成,到10^{17}秒时形成了星系团。然而,星系是如何从物质分布大致均匀的宇宙中脱颖而出,形成星系这种形态的呢?大致有两种说法。一种认为是“引力不稳定性”造成的。在巨大的均匀分布的物质团中,稍微有一点点不平衡的因素,就会在自身的引力下慢慢扩大,并逐步破坏物质的均匀性而变得稀疏不一,进而形成星系。另一种说法是“宇宙涡流假说”。这种假说认为在大爆炸发生后不久,辐射压力使分布均匀的物质团中产生了湍

动与涡流，湍动与涡流的相互碰撞混合，进一步在原本分布均匀的物质团内形成一块块密度较大的物质，每一块物质后来就变成了一个星系。

六、暗　物　质

星系中除了大量的恒星、星团和星云之外还有别的物质存在吗？回答是当然有，而且很多。但是这些物质不像恒星、星团和星云那么明亮，不易被人们发现，因此称它们为暗物质。早在20世纪30年代初期，著名的荷兰天文学家奥尔特在研究恒星的运动时就明确指出，从恒星来回穿越银道面的运动来看，银盘中对恒星起引力作用的物质大约还有一半是看不见的。1983年，英国天文学家霍金斯发现一颗距银心20万光年的天琴座RR型变星的视向速度高达465千米/秒。据此他认为要产生这么大的速度，银河系的总质量至少应比银河系发光物质的质量之和大10倍，即银河系中90%的质量是看不见的。究竟暗物质在银河系中占多大比例，目前还没有明确的结论。

暗物质虽然不能由望远镜直接观测，但它们的引力却会暴露出它们的存在。天体绕银河系中心的公转速度，取决于在它的轨道内所有物质的总质量。太阳系中九大行星围绕太阳作轨道运动，离太阳越远的行星，在轨道上运行的速度越小，遵从开普勒第三定律。银河系也一样，星系上各点均围绕银河系中心旋转，按理其旋转速度应该随离星系质量中心越远而下降，如图12-17上的实线所示。但是，图中“+”线显示的观测结果却不是这样，在离质量中心很远的地方，速度并不下降。这表明，随着距离的增加，轨道以内的质量也在增加。然而，在远离银河系中心的地方，看得见的物质非常少，实际上已经看不见物质了，我们只能把所增加的质量看成是看不见的物质，通常称为暗物质。

暗物质不是银河系特有，河外星系也一样，有着非常多的暗物质。图12-18是旋涡星系NGC2403的光度和旋转曲线。纵坐标是以对数表示的表面亮度（上图）和旋转速度（下图），横坐标为离星系中心的距离。从上图可以看出，星系的表面亮度随离中心距离的增加迅速地减少，由

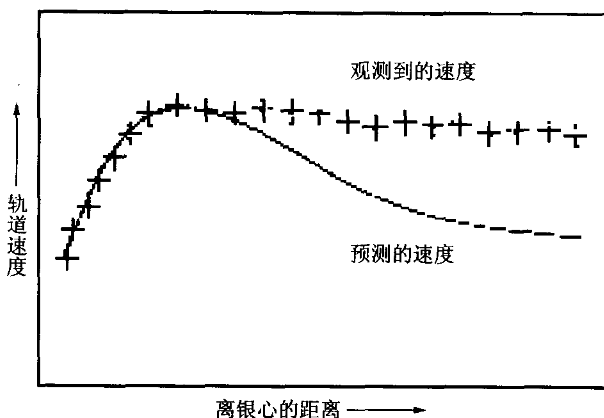


图 12-17　银河系自转速度曲线

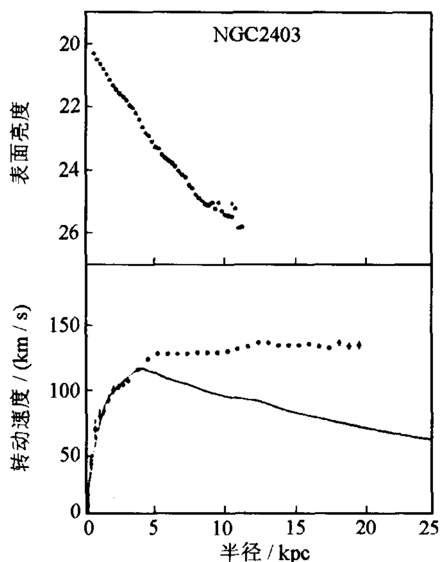


图 12-18　旋涡星系 NGC2403 的光度和旋转曲线

于表面亮度是对数坐标，亮度随距离下降是按指数形式，很快就下降几个数量级，特别是在 12 kpc 处以远就已经看不见了。如果所有物质都是看得见的，那么它的分布应该和亮度分布一样，在 12 kpc 以远的地方就没有物质了。旋转曲线应该是下图的实线，但观测得到的是如虚线所示，在 5 kpc 以远的转动速度几乎不随距离变化。因此，有理由认为，这个星系存在一个巨大的看不见的晕。星系的这个暗晕虽然很稀薄，但延伸到非常远的地方，暗物质的总质量比看得见的物质还要大，甚至可以高出一个数量级。

从银河系和河外星系存在星系晕和星际存在暗物质的事实，可以预

计宇宙中暗物质相当多，其质量比看得见物质要高出 10 倍，甚至数十倍、上百倍。

暗物质究竟是些什么？由于没有看见，不可能把它们一一列举出来，很可能其中有不少是人类尚未认识的物质。从组成物质的基本粒子来说，暗物质粒子必须是质量大、寿命长、作用弱的粒子。已知粒子中同时具备这三种性质的还没有，寿命长的粒子只有质子，但它的作用却不弱，寻找同时具有这三种性质的粒子将是今后关注的研究课题。

就现在已有的认识，暗物质中将包括不发光或发光微弱的岩石、木星状行星、矮星、没有辐射或辐射束没有指向我们的中子星、黑洞等等，还有星际物质。

星际之间存在的物质极其稀薄，稀薄到了比地球上的人造真空还稀薄的程度。但是由于恒星际空间实在是太广阔了，这么稀薄的星际物质积累起来，也不能等闲视之。

如何搜寻暗物质成为天文学家的一大难题。因为用通常观测恒星、星云、星系的方法是根本找不到它们的。目前，天文学家正在试图采用其它方法，例如利用微型引力透镜效应方法来找到它们。

思考和复习题：

1. 为什么哈勃被誉为“星系之父”？
2. 叙述哈勃定律的内容和意义。
3. 什么是造父变星和造父变星测距法？
4. 试说明红移的定义和它在天文学上的重要性。
5. 星系有哪几类？
6. 什么是暗物质？

第十三讲

X 射线和 γ 射线天文学

天体的 X 射线和 γ 射线的观测和研究属于高能天体物理学领域。人们为了探测宇宙 X 射线和 γ 射线，从气球、火箭到人造卫星，从简单的低分辨率计数器到 X 射线和 γ 射线望远镜，开辟了一个十分重要的认识宇宙的窗口，使一门新兴的学科迅速发展起来。X 射线和 γ 射线天文观测的发展所遇到的困难不仅是要把复杂的观测设备送上太空，而且还要克服观测设备分辨率太差的状况。20 世纪最后 20 多年是 X 射线和 γ 射线获得巨大发展的年代。爱因斯坦天文台、伦琴 X 射线天文卫星和钱德拉 X 射线天文台三项大型空间观测设备由于配置了 X 射线掠射望远镜，大幅度地提高了分辨率和灵敏度，以极其丰富的观测成果令世人瞩目。美国天文学家里卡尔多·贾科尼由于对 X 射线天文学突出的贡献荣获 2002 年度诺贝尔物理学奖。康普顿 γ 射线天文台是 20 世纪空间望远镜的代表作之一，它所携带的 γ 射线探测设备的综合探测能力达到了最高峰。X 射线和 γ 射线波段在整个电磁能谱中占据了相当大的部分，蕴藏着宇宙天体极其丰富的信息。由此形成了两门崭新的学科，实现了天文学观测研究的又一次飞跃。

一、天体 X 射线的观测

X 射线和 γ 射线属于高能光子，习惯上不用频率或波长，而用它们的能量电子伏(eV)表示，由电子伏可以算出频率或波长。可见光光子的能量在 2～3 eV 之间，X 射线光子的能量在 0.1～500 keV 范围，γ 射线光子则包括了 500 keV 到 10^{16} eV 的能量范围。实际上 X 射线和 γ 射线的分界是相当不严格的，常常也把 γ 射线看做是高能 X 射线。由于地球大气将所有从远紫外线到 γ 射线的电磁波全部吸收掉，早期就用气球和火箭把观测设备带到大气层之上去接收天体的 X 射线和 γ 射线。后来才发展到把观测设备放在人造卫星上，发射上天成为空间高能天文台。

1. X 射线的发现和天体 X 射线源的发现

X 射线是由德国著名物理学家伦琴在 1895 年发现的。当时他在进行阴极射线管的实验时发现实验室里存放着一些包装完好的照相底片被曝了光。伦琴再做实验时，就用黑纸将阴极射线管包裹好，以防止其它底片再曝光。但是在黑暗的实验室里距离阴极射线管 2 米左右有一块荧光屏却发出了淡淡的绿光。这又使伦琴十分纳闷，无意中他将自己的一只手放在包着黑纸的阴极射线管上，他看到那辉光闪烁的荧光屏上竟然出现了手的影子，令他震惊。他的手动一动，荧光屏上手的影子也跟着动一动。这时，伦琴茅塞顿开，认定是阴极射线管产生了一种人的眼睛看不见，但是却能穿透纸和木板等物质的射线。伦琴将这种奇妙的射线称做 X 射线，表示它对于人们来说还是一个未解之谜。伦琴因这一伟大的发现于 1901 年荣获了第一届诺贝尔物理学奖。



图 13-1　德国物理学家伦琴

X 射线是一种高能光子，由于能量巨大又不带电，故穿透力极强。X

射线发现后很快就从物理实验室进入工业生产、医疗和科学研究的广阔领域。但那时,人们对于来自宇宙空间的X射线却毫无所知。人类对于天体X射线辐射的观测和研究举步维艰。1948年,美国天文学家利用高空火箭接收到了太阳的X射线辐射,这是人类首次接收到天体的X射线辐射。1962年6月,美国麻省理工学院以里卡尔多·贾科尼为首的天文学家小组对原来的探测方法进行了改进,准备利用高空火箭探测太阳辐射产生的月面荧光X射线辐射。6月18日,他们从高空火箭的资料中意外发现了天蝎座方向的强大X射线源,同时发现了宇宙X射线弥漫背景。这一发现揭开了X射线天文学的序幕,人们对天体X射线的关注程度大大提高。60年代当中,天文学家利用高空火箭的观测得到了初步的X射线天图,发现的大部分X射线源都集中在银道面附近。

2. X射线探测卫星和X射线掠射式望远镜

X射线天文学获得长足发展是在X射线天文卫星发射上天以后。卫星可以在太空停留好几年,也能携带更多的探测设备,相当于在太空中建了一个天文台。最先用于X射线观测的卫星是美国NASA的小型天文卫星系列(SAS)。虽然功能较差,但它们得到的开创性成果依然显赫。第一个SAS-1于1970年12月7日发射,叫"自由"号,也译为"乌呼鲁",接收能量范围2～20 keV的X射线。天体的X射线辐射是一个未被开发的处女地,真是遍地是黄金,新发现接踵而至。1973年发表的第三个X射线源表(简称为3U),总共包含161个X射线源。最大的成功是发现和证实了一类新的X射线源——X射线双星。"自由号"卫星的发射上天被公认为X射线天文学发展的一个里程碑。之后,各国陆续发射一批小型探测X射线的天文卫星,均有所发现。

在这之后,X射线卫星的发展非常迅速,由三位科学巨匠的名字命名的爱因斯坦天文台、伦琴X射线天文卫星和钱德拉X射线天文台相继飞上太空,成为当代最先进的X射线观测天文台,把X射线天文学推向一个又一个高潮。

X射线天文观测发展中遇到的最大困难是它的分辨率无法与光学

或射电望远镜相比。早期的X射线和γ射线探测器采用高能物理实验用的正比计数器、闪烁计数器等。计数器的面积越大所接收到的光子数目越大，灵敏度越高。但是，计数器本身没有任何成像和定向功能。计数器的前面放置一个筒状物作为准直镜，可以获得一定的空间分辨率，用这种方法获得的方向性当然是比较差的。这也是早期的X和γ射线观测很难确定辐射源位置的原因。X射线与可见光不同，有很强的穿透力，无法采用类似光学望远镜凹面镜或射电望远镜的抛物面天线的方法来会聚来自天体的X射线光子。X射线又很容易被介质吸收，而且在介质中的折射率接近于1，因此类似光学望远镜的折射系统也不可能用于X射线。

掠射式X射线望远镜的发明是关键性的进展，解决了困惑天文学家多年的一大难题。研究表明，X射线也不是完全没有被介质全反射的可能，当入射角非常小时，如小于2度，就可能被介质全反射，这就是掠射现象。1952年，沃尔特首先提出利用X射线的掠射的全反射现象来进行聚焦。如图13-2所示，与光学望远镜在观测时需要对准目标的情况完全不同，它几乎让镜面顺着X射线源。反射面形状采用有焦点的双曲面、抛物面或椭圆面。X射线掠射望远镜使大面积X射线光子聚焦成像成为现实。

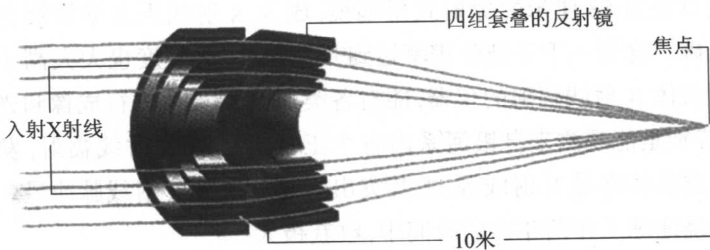


图 13-2　X射线掠射望远镜的工作原理

根据X射线的性质，X射线又可细分为软X射线和硬X射线两类。软X射线的波长较长、能量较低，与紫外波段相邻；硬X射线的波长较短、能量较高，与γ射线波段相接。掠射望远镜只适用于软X射线，硬X

射线只能利用计数器直接记录。

3. 探测天体X射线的三大设备

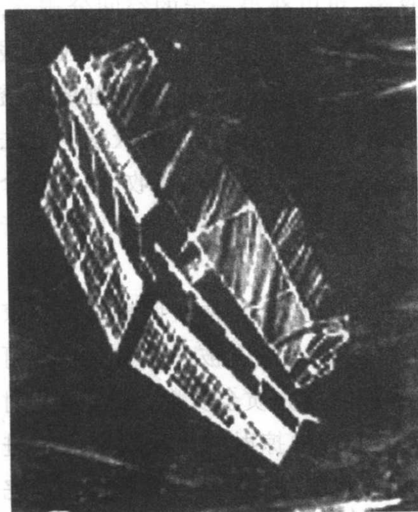


图13-3　爱因斯坦天文台

由三大科学巨匠名字命名的三个X射线观测设备获得极其丰富的观测成果，像它们的名字一样令世人瞩目。

第一个大设备是美国1978年11月13日发射的爱因斯坦天文台（图13-3），这是为了纪念爱因斯坦诞辰100周年而命名的。它是美国高能天文台（HEAO）系列卫星中的第二颗。第一颗"HEAO-1"是一个全天X射线巡天设备，位置的精度达到30角秒，在天空工作了18个月，使X射线源的数目猛增到1500多个，其中包括河外X射线源圆规座——X1。爱因斯坦天文台首先配置了一架口径为58厘米的掠射式望远镜，成为X射线天文学发展的第二个里程碑。这样一下子把分辨率达到几个角秒，灵敏度也大大高于以前的探测天体X射线辐射的仪器，能对各类X射线天体进行成像和光谱的观测，特别是能观测来自银河系内各个正常恒星的X射线辐射，发现绝大多数类星体都是X射线源，尤其突出的是发现了X射线脉冲星。在太空中环绕地球工作两年多的时间中，收获极大。

第二个大设备是德国、美国和英国于1990年6月1日联合发射的伦琴X射线天文卫星（图13-4）。这个项目是在伦琴发现X射线80周年之际由德国马克斯·普朗克地外物理研究所的科学家首先提出的。它有两架口径分别为84厘米和57厘米的成像X射线望远镜，两台方位正比计数器，适用于低能X射线（0.1～2.0 keV）探测。它的观测能力较爱因

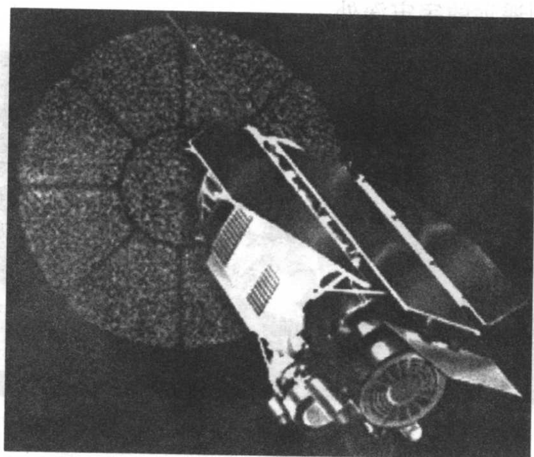


图 13-4　伦琴 X 射线天文卫星

斯坦天文台有较大的提高，大面积成像的灵敏度比爱因斯坦天文台高两个数量级，定点观测的灵敏度也高出 3 倍。它的原设计寿命为 3 年，而实际上它在太空中成功地运行了 8 年半，于 1998 年 12 月结束使命。它共发现 X 射线源 10 多万，达到了此前已知 X 射线源总数的 20 倍。伦琴卫星给予我们极大的回报，从最近的月球到最远的类星体，从微小的中子星到最大的星系团，几乎在所有的天体研究领域都带来了新的发现。

第三个大设备是美国研制的钱德拉 X 射线天文台(图 13-5)，这个卫星原名 X 射线天文物理实验室(AXAF)，为纪念世界著名美籍印度天体物理学家钱德拉塞卡在发射前改名，1999 年 7 月 23 日由哥伦比亚号航天飞机送入太空(图 13-6)。这台 X 射线望远镜是当今进入太空的最先进、最强有力的观测设备，它比现今在轨道上运行的其它十几台 X 射线探测器的威力强 10～100 倍。“钱德拉”全长 11.8 米，总重 21 吨，耗资 15 亿美元。设计寿命为 5 年。它的主体是一台大型的掠射式 X 射线望远镜，望远镜的反射镜由四个中空的表面镀了金属铱的玻璃圆柱体套叠而成，这四个圆柱体有共同的轴线，也有共同的焦点，焦距是 10 米。入射的 X 射线光子从这些中空的圆柱体内表面掠射到焦点处，被放置在焦点处的 X 射线计数器所接收，聚焦成像，灵敏度大大提高，从而使 X 射线

的探测扩大到遥远的宇宙深处。

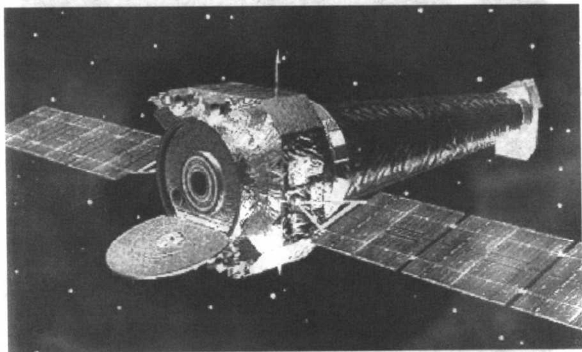


图 13-5 钱德拉 X 射线天文台

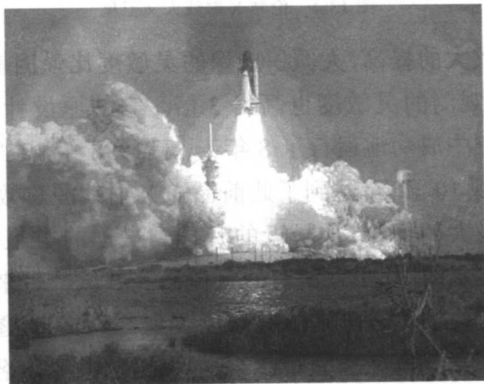


图 13-6 发射钱德拉 X 射线天文台的场景

钱德拉 X 射线天文台的主要任务是观测星系、类星体和恒星的 X 射线辐射,并努力寻找宇宙中的黑洞和暗物质。“钱德拉”7 月 23 日上天,美国宇航局于 7 月 26 日就公布了由它发回的首批照片,其质量之好令人们赞叹不已,充分显示出这台仪器的高分辨率和高灵敏度。类星体 PKS0637-752 是钱德拉 X 射线天文台的第一张图,原本天文学家以为仅能够获得这个类星体的点状图像,但却意外地发现了类星体的巨大的喷流,如图 13-7 所示,在类星体右边的喷流至少长 20 万光年。

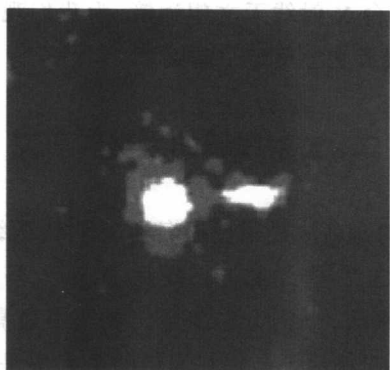


图 13-7 类星体 PKS0637-752 的 X 射线辐射及其喷流

4. 贾科尼荣获 2002 年诺贝尔物理学奖

在回顾 X 射线天文学发展的历程时，我们应该记住美国天文学家、美国科学院院士里卡尔多·贾科尼的贡献。贾科尼出生于意大利，1954 年在米兰大学获博士学位，1956 年获富布赖特奖学金赴美进行研究工作至今。他是发现太阳系外第一个 X 射线源和第一次证实宇宙存在着 X 射线背景辐射的学者，一直站在这个学术领域的最前沿，推动着 X 射线天文学不断地发展。1970 年他参与发射第一颗“自由”号 X 射线卫星。他领导研制的爱因斯坦天文台于 1978 年进入太空，首次提供了精确的宇宙 X 射线图像。1976 年，他倡议并亲自参与设计耗资 15 亿美元的钱德拉 X 射线天文台。



图 13-8 天文学家里卡尔多·贾科尼

2002 年瑞典皇家科学院发表的新闻公报，宣布把 2002 年度诺贝尔物理学奖的一半授予里卡尔多·贾科尼，表彰他“发明了一种可以放置在太空中的探测器，从而第一次探测到了太阳系以外的 X 射线源，第一次证实宇宙中存在着隐蔽的 X 射线背景辐射，发现了可能来自黑洞的 X 射

线,他还建造了第一台X射线天文望远镜,为我们观察宇宙提供了新的手段,为创立X射线天文学奠定了基础。”

二、X射线源的发现和研究

X射线源最初的命名法是用星座名和X射线源编号表示,最强的源为X-1,次强的源为X-2,依此类推。按此法,半人马座X-3应是这个星座中第三强的X射线源,事实上它却是该星座中最亮的源,这是因为早先判断有误,也就将错就错了。现在通用的命名法是星表缩写名之后加上该源在天球上赤道坐标的赤经赤纬值。银河系内的X射线源有太阳、彗星、超新星遗迹、部分射电脉冲星、X射线脉冲双星、X射线暂现源和X射线爆发源。银河系外则有正常星系、活动星系、类星体、星系团和弥漫的X射线背景辐射。所有这些X射线源中,X射线双星的发现是最为耀眼的成果。

1. X射线脉冲星

X射线双星系统由一个中子星和一个光学伴星组成,光学伴星质量的大小决定了这个双星系统的性质。伴星为年轻大质量恒星的称为大质量X射线双星(HMXB),一般分布在银道面附近。伴星为老年小质量恒星的称为小质量X射线双星(LMXB),一般分布在银河核球和球状星团中。

在X射线双星中有一类很特殊,接收到的X射线辐射呈现周期性脉冲特性,就像第九讲中介绍的射电脉冲星的辐射特性那样,因此把这类X射线双星称为X射线脉冲星。X射线脉冲星均为大质量X射线双星,但不是所有大质量X射线双星都有X射线脉冲发射。

最早发现的X射线脉冲星是半人马座X-3(CenX-3)和武仙座X-1(HerX-1)。与射电脉冲星类似,具有比较短的周期,分别为4.84秒和1.24秒,表明自转得很快,很快就被确认为中子星。这两个X射线脉冲星都有周期性的掩食现象,证明是双星系统。CenX-3的辐射每隔2.087

天就会停止约 12 小时，然后重新开始辐射。HerX-1 的辐射则是每 1.7 天停止 6 小时。这是因为发射 X 射线脉冲的星因轨道运动被伴星遮挡的缘故。CenX-3 的平均光度比太阳所有波段的辐射总和还要强 1 万倍。由 HerX-1 的双星轨道运动参数定出 X 射线源的质量为 0.5～1.8 个太阳质量之间。

现已发现 30 多个 X 射线脉冲双星，光学伴星的质量都是 10～30 个太阳质量的早型星，光学光度大。脉冲周期在 69 ms～835 s 之间，其中有 9 个的周期在射电脉冲星周期范围之内，大多数的周期则比较长。双星轨道周期在 41 min～835 d(天)之间，比较短，因此公认 X 射线脉冲星属于密近双星系统。早期的观测认为周期随时间变短，属于自转加速型，并把它归因于中子星吸积伴星物质导致角动量的增加。现已查明，只有脉冲周期短的 X 射线脉冲星或多或少呈现自转加速的趋势，其它的 X 射线脉冲星的周期变化则没有规律，有时加速，有时减速。

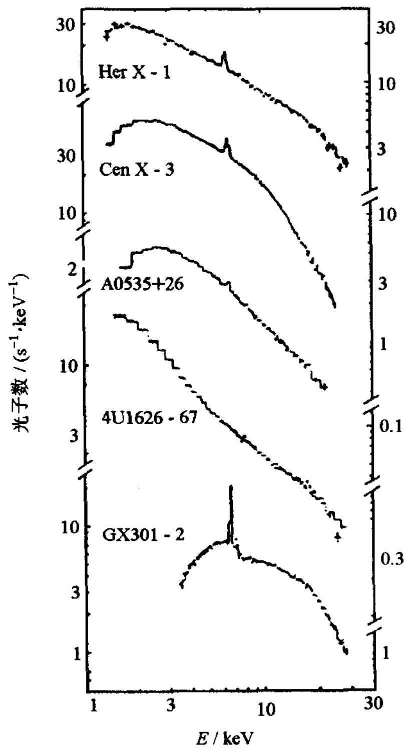


图 13-9　5 颗 X 射线脉冲星的平均能谱

图 13-9 给出 5 颗 X 射线脉冲星辐射的谱分布，纵坐标是单位时间单位能段内接收到的光子数，横坐标是频率。这 5 颗 X 射线脉冲星均具有幂律谱的特性，在高频端和低频端的光子计数率迅速下降。从图上还可以看出，有些 X 射线脉冲星的连续谱上还存在发射线谱，那是铁元素 6.4 keV 附近的谱线。在 GX301 的连续谱上还可以看到 7.3 keV 处的吸收线。吸收线来源于强磁场中电子能级的量子化和电子在不同能级之间的跃

迁，只有像中子星那样强的磁场才会产生这样的吸收线，也就是磁场强度要达到 10^8 T(特斯拉)的数量级才有可能。观测到这些吸收线，也就间接地证认了 X 射线脉冲星是中子星。由这些吸收线可以估计出一些 X 射线脉冲星的磁场：HerX-1 的两条吸收线能量是 38 keV 和 70 keV，磁场强度为 3×10^8 T；4U0115+63，吸收线为 11.5 keV 和 23 keV，磁场 1×10^8 T；1E2259+586，吸收线为 7.3 keV，磁场 5×10^8 T；4U1538-52，吸收线为 21.5 keV，磁场 1.8×10^8 T。磁场强度单位特斯拉(T)是国际单位制，但是在过去甚至现在的科学文献中，常用高斯来表示，1 特 $=10^4$ 高斯。我们需要熟悉这两种单位制之间的换算。

2. 双星系统中的吸积

X 射线脉冲星的自转周期很短，说明辐射 X 射线脉冲的是中子星，双星轨道周期很短，表明两个子星相距很近，是密近双星系统。由于两颗星相距很近，它们周围的引力场要由两颗星的引力决定。单星情况下，引力的等势面是以恒星为中心的球面，密近双星系统的等势面很复杂，有很多个等势面，其中有一个形状像阿拉伯数字 8 的等势面。1850 年法国数学家埃多瓦·洛希首先研究了这个问题，因此称为洛希瓣。两个瓣的交点处是引力等于零的地方。这交点称为第一拉格朗日点。

图 13-10 的上部分是伴星充满洛希瓣的情形，其表面物质可以通过两个瓣的连接点流入主星。当伴星没有充满洛希瓣时(图下部)，伴星只能以星风的方式丢失物质，星风带走的物质比较少，又是吹向四面八方，只有很少一部分物质被主星俘获。X 射线双星的两颗星分别处在两个瓣中，中子星可以被看做是洛希瓣中的点源，而光学伴星的大气则可能充满整个洛希瓣，在这样的情况下，光学星的物质可以轻而易举地通过交点跑到中子星所在的洛希瓣中，被中子星所控制和俘获。来自伴星的物质在中子星周围形成一个盘状

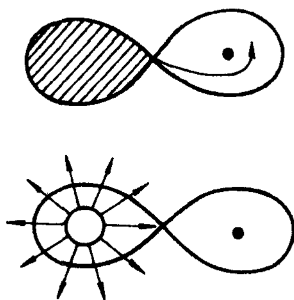


图 13-10　密近双星的洛希瓣

物，称为吸积盘。吸积盘内沿的物质可以沿中子星的磁力线落向磁极。中子星有很强的引力，吸积盘的物质落到中子星的表面要经过很长一段距离，引力势能转变为动能，下落速度可达10万千米/秒。物质以如此巨大的速度撞击中子星的固体外壳，所释放的能量转变为X射线波段的辐射。因此X射线双星系统的X双星辐射属于热辐射的性质。由中子星和红巨星组成的X射线脉冲星的模型见图9-12。

吸积是X射线脉冲星辐射的能量来源。若中心天体的质量为M，半径为R，吸积释放的引力能与其静止质量能量之比就是释能效率：

$$\eta = (GM/R)/c^2,$$

式中的G为引力常数，M/R的值越大，效率越高。中子星的半径很小，质量与太阳相当，所以效率很高，达到0.15，比热核反应的效率高出20倍。这里假定吸积物质释放的引力能全部转化为自身热能，发出辐射。对于中子星来说，若光度为10^{31} J/s，则辐射的波段在1 keV$\leqslant h\bar{\nu}\leqslant$50 MeV，处在X射线和γ射线波段。

3. 射电脉冲星的X射线脉冲辐射

射电脉冲星已发现1700多个，只有极少数在光学、X射线和γ射电波段上有脉冲辐射。共有27颗脉冲星具有X射线辐射，其中仅11颗脉冲星有X射线的周期脉冲辐射。有2颗脉冲星，即PSR0540-69和PSR1509-58的周期脉冲性质是由爱因斯坦天文台的X射线观测首先揭示，然后才在射电观测中检测到。伦琴X射线卫星发现PSR0630+18的周期为0.237秒的X射线脉冲辐射，然而在射电波段的观测却检测不到脉冲信号，最后才在低频100 MHz上检测出周期脉冲。

这些射电脉冲星的X射线辐射光度都比射电光度大，PSR0540-69，0531+21和1509-58的情况更突出。蟹状星云脉冲星PSR0531+21和船帆座脉冲星PSR0833-45是全波段天体，从射电、红外、光学、紫外、X射线到γ射线都有周期脉冲，成为天体物理观测和研究的热门对象，但以往的观测仅仅给出它们的时间特性和辐射特性，而“钱德拉”的X射线观测却给出了脉冲星两极的喷流和围绕中心喷流的环状物质，对检验和

构造脉冲星的理论模型提供了最好的根据(见图 13-11,图 13-12)。

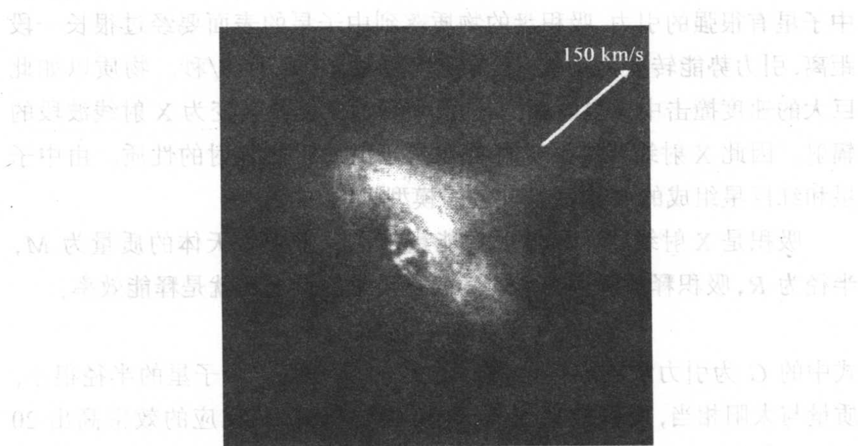


图 13-11　"钱德拉"拍摄的蟹状星云脉冲星及其周围环境图

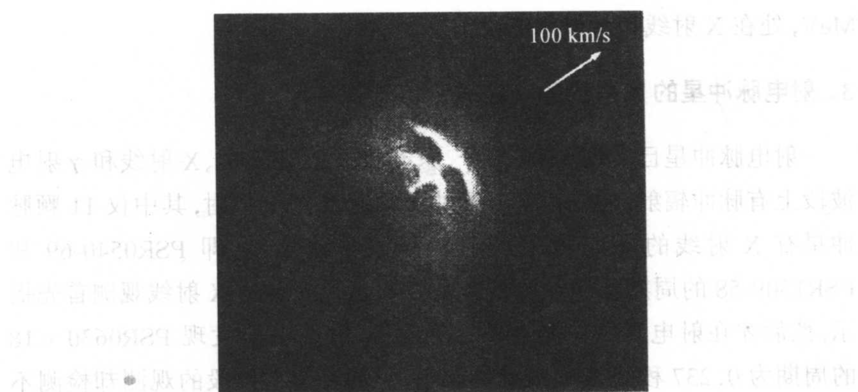


图 13-12　"钱德拉"拍摄的船帆座脉冲星及其周围环境图

4. 恒星级黑洞候选者天鹅座 X-1

银河系内 X 射线源有一个共同的特征,就是它们的 X 射线强度在变化,变化时标为小时、分,甚至秒。天鹅座 X-1 是最早发现的 X 射线源之一。它的强度就有这种不规则的快变,甚至有毫秒量级的亮度变化。这

种强度的变化常常用来估计 X 射线发射区的大小。一个辐射源如果仅仅是其中很小的区域发生变化,观测者是察觉不出来的。只有当局部区域的光度变化迅速引起其余部分也变化,才能造成观测到的变化。最大的传播速度为光速,由辐射变化时标可以估计辐射源的大小。天鹅座 X-1 的辐射具有 1 毫秒的变化时标,可以推出辐射源的最大尺度为 300 千米。

天鹅座 X-1 的射电和光学观测确认它是双星系统的一员,轨道周期为 5.6 天,伴星为温度很高呈蓝色的可见恒星 HDE226868,其质量很大,在 25~40 个太阳质量之间。天鹅座 X-1 的 X 射线辐射没有掩食现象,说明这个双星系统的轨道倾角较大,光学星对 X 射线星的遮挡很小。天文学家判断天鹅座 X-1 的质量超过 7 个太阳质量,由于远远地超过了中子星质量的上限,因此把天鹅座 X-1 看成恒星级黑洞的最有可能的候选者,成为宇宙探测研究中最为热门的天体之一(见图 10-6)。

5. X 射线变源

银河系中有一种暂现 X 射线源,平时不辐射或辐射极为微弱,但它突然发亮时,辐射变得很强,所以又称为 X 射线新星。例如位于金牛座方向的暂现 X 射线源 A0535 + 26,亮度极大时比蟹状星云还亮得多,成为天空中最亮的 X 射线源。但几星期到几个月以后就暗淡无光了。对于暂现 X 射线源,天文学家认为是一种轨道偏心率很大的双星体系。光学子星不断发射星风,当致密子星运行到光学子星附近时,物质吸积量迅速增大,X 射线辐射急剧加强。当远离光学子星时,吸积量迅速减小,X 射线辐射也随之减弱。

1975 年开始,卫星观测发现快速 X 射线爆发源,大部分在银河系内,大多数在银道面附近,有少数在球状星团中。这类源的 X 射线强度在小于或接近 1 秒的时间内突然增强几十倍,持续时间约几秒到几十秒(见图 13-13)。X 射线爆发具有重复出现的特性,但却没有准确的周期。大多数 X 射线爆发的两次爆发间隔为几小时到几天,甚至更短。对于多数爆发源,两次爆发之间有稳定的 X 射线辐射,当稳定辐射处于低强度

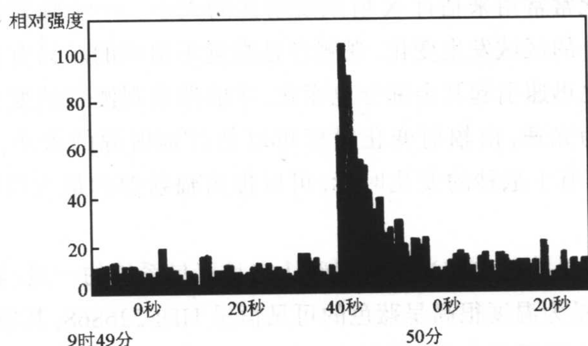


图 13-13　一次 X 射线爆发记录

时才出现 X 射线爆发。粗略估计 X 射线爆发的极大功率比太阳耀斑的 X 射线辐射强一百亿倍。

一般认为,X 射线爆发源是在小质量 X 射线双星(LMXB)中,也就是中子星和一个质量比较小的老年光学星组成的双星系统。显然,这个系统中的中子星的年龄也比较老,磁场较弱,对吸积物质的控制作用不大,因此由伴星来的物质可以落到整个中子星表面,吸积物质聚集到一定程度以后,就有可能导致核聚变,先有氢核聚变为氦核的聚变,再有氦核的聚变,从而产生一次爆发。

三、γ 射线天文学的发展

γ 射线天文学是 20 世纪 60 年代后期发展起来的一门新兴学科,它研究来自银河系内外的 γ 射线波段电磁辐射。在电磁波谱中,γ 射线波段的能量最高,覆盖的波段最宽,携带着天体的丰富的信息,成为研究宇宙天体的一个独特的波段。

1. 起步晚发展快的 γ 射线天文学

虽然 γ 射线天文学的概念的形成比 X 射线天文学还早一些,但由于宇宙天体的 γ 射线光子的流量比 X 射线波段的流量要小得多,而仪器的

背景辐射又很强，观测上的困难导致学科发展缓慢。只是到了 20 世纪 90 年代，才得到长足的发展。

早在 1900 年，物理学家在研究镭的放射性时就发现了 γ 射线。γ 射线是一种不带电的高能光子，有很强的穿透力，能使乳胶感光。核物理学和粒子物理学的研究表明，众多的核反应都会产生 γ 射线，在天体上无时无刻不在发生这样的物理过程。1958 年天文学家莫里森预言某些天体可能发射很强的 γ 射线。由于 γ 射线光子具有很强的穿透力，遥远天体发出的 γ 射线能很容易到达地球附近。只是因为地球大气的吸收而不能到达地球表面，与 X 射线天文学一样，只能进行空间探测。不过，光子能量大于 10 万 MeV 的高能 γ 射线，可以在高山和海平面上用大气切连科夫技术和广延大气簇射阵列进行观测。这仅仅是一种间接的测量。这是利用能量超过 2 个静止电子质量所对应的能量的 γ 射线光子，与大气作用转化为一个正电子和一个负电子，以及由此所引起的一连串的连锁反应，可被地面上的探测设备所接收。

最早发现辐射 γ 射线的天体是太阳，1972 年发射的天文卫星“轨道太阳天文台 7 号”观测到太阳耀斑期间所发出的强烈的 γ 射线。同年，美国发射“小型天文卫星 2 号”(SAS-2)探测宇宙 γ 射线取得成功，粗略地给出银河系大尺度 γ 射线强度分布图和一些强源。

“SAS-2”上有一台“火花室”作为 γ 射线探测器。来自宇宙天体的高能 γ 光子进入火花室后产生正负电子对，检测这些电子就可以探知接收到多少个 γ 光子。“SAS-2”在太空中工作了 7 个月，只检测到 8000 个 γ 光子。可以说 γ 射线天文学就是从这颗卫星开始的。

1975 年欧洲空间局发射名为“COS-B”的卫星，它也装备了一台火花室 γ 射线光子检测器。探测 γ 射线的能力比“SAS-2”高很多。在太空中工作了 8 年，一共探测到 10 万多个 γ 射线光子。天体发射出的 γ 光子数是很少的，可以说是稀稀拉拉，平均要半个小时才检测到一个光子。但是，一个能量为 3 MeV 的 γ 光子相当于 100 万个可见光光子的能量，浩浩荡荡的一大批可见光光子的能量也抵不上一个 γ 光子。在这 10 多万 γ 射线光子中蕴藏着包括银河系 γ 射线点源、弥漫 γ 射线背景辐射、γ 射

线脉冲星和γ射线爆发等等的信息。

2. 康普顿γ射线天文台

1991年4月由航天飞机“大西洋号”发送上太空的康普顿γ射线天文台是美国宇航局20世纪90年代四大空间望远镜计划之一(图13-14)。也是迄今为止获得成果最多的卫星之一。它以美国高能物理学家康普顿(1892—1962)的名字命名。康普顿发现X射线被晶体散射后散射波波长变长的现象,并提出正确的理论解释。他因此荣获1927年诺贝尔物理学奖。康普顿γ射线天文台的主要研究对象是宇宙中那些最为活跃的天体,如超新星爆发、类星体、γ射线爆发等。已探测到400个γ射线源,超过以往探测到的数目的10倍,记录到2500多个γ射线爆发。还发现一批天文学家尚不知道是什么性质的天体。可谓取得了大丰收,把宇宙天体γ射线的研究推上了新的高潮。

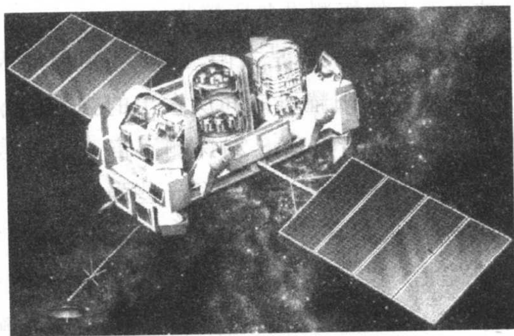


图13-14 环绕地球轨道运行的康普顿γ射线天文台

康普顿γ射线天文台所携带的γ射线探测设备是当今最先进的。它的综合探测能力达到了最高峰。以往发射的诸多空间γ射线探测卫星只能探测很窄能量范围的光子。而“康普顿”所能探测的能量范围却异常地宽——从30千电子伏到300亿电子伏。跨越了5个数量级,更能全面了解γ射线源的性质。探测中采用四种适用于不同能量范围的新型计数器。另外,装备四台仪器用于不同种类的观测工作:第一台仪器是“爆发和暂现源实验”(简称为BATSE),主要用于探测短时标的γ射



图 13-15　著名物理学家康普顿

线爆发，能谱范围在 30 keV～3 MeV 之间，分辨率随能量的不同而不同，可达 1°～6°；第二台仪器是“取向闪烁能谱实验”（简称 OSSE），适合于测量不同天体的低能 γ 射线谱（50 keV～10 MeV），主要观测超新星爆发中的不稳定同位素所产生的 γ 射线；第三台是“康普顿成像望远镜”（简称 COMPTEL），用于成像和收集辐射中等能量（1 MeV～30 MeV）的 γ 射线源的能谱，方位可定准到约 0.5°；第四台仪器是“高能 γ 射线实验望远镜”（简称 EGRET），主要用来探测极高能量范围中的 γ 射线源，对强源可以准确定位到约 0.1°。

康普顿 γ 射线天文台可以对整个天空进行巡查，也可以对某些重点天体进行长达两周的跟踪观测。这不仅使它具有超凡的巡天能力，也使其观测灵敏度有相当大的提高。“康普顿”的灵敏度要比以前各种 γ 射线探测器高出 10 倍。它的观测成果超过以往发射上天的其它 γ 射线观测卫星，对太阳活动、脉冲星、超新星遗迹、星系和黑洞候选者的 γ 射线辐射，特别是对 γ 射线爆发的观测发现都有惊人的成就。

康普顿 γ 射线天文台设计寿命为 2～5 年，但是却在太空工作了 9 年。1999 年底，控制定位的三个陀螺仪中有一个失灵，尽管如此它仍有可能继续在太空中工作一段时间，但是这个重达 17 吨的巨大的 γ 射线

卫星一旦受到进一步损坏，将会突然坠落到地球大气层，必将有一部分未燃烧完的碎片降落到地面上。为了避免造成可能性并不太大的伤亡事件发生，决定放弃这颗卫星，于2000年6月初由地面发出指令引导它坠落到太平洋中。

康普顿γ射线天文台坠落了。它的继任者将是国际γ射线天体物理实验室(INTERGDAL)和大天区γ射线空间望远镜(GLAST)，还有迅速太空船计划(Swift Spacecraft)。国际γ射线天体物理实验室侧重对单个源的观测，能谱在15 keV～10 MeV范围，灵敏度比康普顿γ射线天文台又提高了一个数量级。并将提供在γ射线波段进行偏振测量的机会。后两项计划正在研制或策划之中。

四、超新星和脉冲星的γ射线观测

由于γ射线探测的分辨率比X射线望远镜低很多，使γ射线点源的观测和发现受到限制。但仍然取得很多重要的结果，其中超新星1987A和脉冲星的γ射线观测成果最为突出。

1．超新星1987A的γ射线辐射

根据元素形成理论知道，恒星中的热核反应过程可以产生多种元素，但是比铁还重的元素只能在超新星爆发过程中产生的超高温和超高密的情况下才会形成。超新星爆发是大质量恒星晚期演化的产物，在核燃料燃烧殆尽之后引起内部的大坍缩形成中子星或黑洞，而外部物质则被炸向四面八方，形成超新星遗迹。随着超新星爆发，恒星中已经形成的各种元素和爆发时产生的新元素也随着进入星际空间，这些元素将会在下一代的恒星及行星中存留。

在超新星爆发时，迅速发生的核反应形成一系列不稳定的放射性同位素核，以及其它一些更稳定的重元素。某些放射性核当其衰变时就会释放出具有不同能量的γ射线。有的放射性同位素会蜕变为另一种同位素，同时发射出能量确定的γ射线。由钴56衰变成铁56和由钴57衰

变成铁 57，发射出的 γ 射线中的一部分可能被超新星产生的膨胀气体云所吸收、散射和再散射，这些 γ 射线最终可能变成可见光。

上述理论研究的结论需要观测来证实。1987 年在银河系邻近的大麦哲伦星系中观察到的超新星 1987A 给天文学家提供了极好的机会。这是 400 年以来地球上可以看见的最亮的超新星。观测发现放射性同位素钴。钴 56 的半衰期为 77 天，从 1987 年到 1990 年，来自此超新星的可见光正好是以这个速率衰减的。太阳活动极大年探测卫星和国家航空航天局探测气球上的仪器还检测出来自这颗超新星上具有 847 keV 到 1238 keV 的 γ 射线。这正好是与钴 56 的衰变相关的能量。

2. 射电脉冲星的 γ 射线辐射

虽然在 1000 多颗射电脉冲星中只有 8 颗射电脉冲星有 γ 射线脉冲辐射，但这几个脉冲星却是最引人注目的 γ 射线源。其中有 4 颗是康普顿 γ 射线天文台发现的。图 13-16 给出 7 颗脉冲星的多波段观测结果。最著名的要算蟹状星云脉冲星(PSR0531 + 21)，它同时有射电、光学、X 射线和 γ 射线辐射的脉冲辐射，周期都是 33 毫秒。而且，这 4 个波段上的平均脉冲都有中间脉冲，脉冲相位很一致。一般认为射电波段是高能带电粒子的曲率辐射，是很陡的幂律谱。光学、X 射线和 γ 射线很可能是由一种与射电波段不同的辐射机制产生的。

周期比蟹状星云脉冲星稍长的船帆座脉冲星也同时有这 4 个频带的脉冲，但是 X 射线脉冲很弱。各波段的脉冲周期都是 89 毫秒，但是平均脉冲却很不相同，射电脉冲只有很窄的主脉冲，γ 射线频段则有主脉冲和中间脉冲，光学和 X 射线频段的平均脉冲轮廓比较宽，似乎也有主脉冲和中间脉冲，但是它们之间相隔只有约 90 度。总之，船帆座脉冲星和蟹状星云脉冲星的多波段辐射特性有比较大的差别。

另一颗令人瞩目的 γ 射线脉冲星是双子座中的 PSRJ0633 + 1746，又称杰明加脉冲星(Geminga)。它的 γ 射线脉冲特别强，却没有射电脉冲，是惟一的一颗由 γ 射线观测发现的脉冲星。除了没有射电脉冲以外，它的许多特性都和现有的射电脉冲星很相似，因此也被认为与蟹状

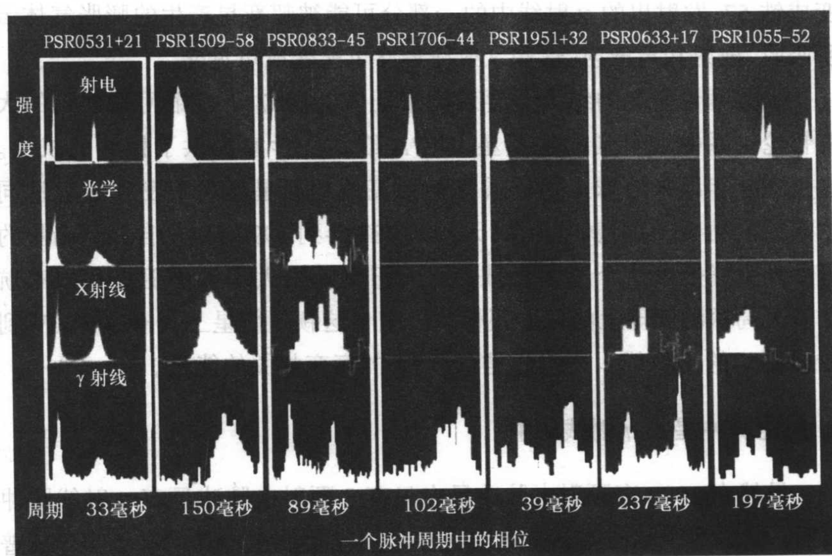


图 13-16　7 颗 γ 射线脉冲星各波段脉冲轮廓的比较

星云脉冲星是同一类型。它没有射电脉冲的原因可能是它的射电辐射束比其 γ 射线窄得多，没能扫过地球。蟹状星云脉冲星的射电脉冲就比其 γ 射线脉冲要狭窄得多。

五、宇宙 γ 射线爆发

氢弹爆炸是激烈的氢核聚变为氦核的反应，在爆炸瞬间要发出强烈的 γ 射线。美国"维拉"卫星在监视苏联核实验的过程中于 1967 年发现了一种短暂的、猛烈的 γ 射线爆发。后来查明这次 γ 射线爆发是来自宇宙空间。这颗军用卫星的这一发现直到 1973 年才解密公布。

γ 射线爆发是天空中最突出、最令天文学家兴奋的对象之一。但是，没有人能确切知道它们是什么，它们位于何处以及是什么原因引起的爆发。正因为它的神秘不可知，激励了天文学家去探求个究竟。康普顿 γ 射线天文台发射上天以后，有关 γ 射线爆发的发现与日俱增，平均每天

发现一个。然而,新的观测资料不仅没有解开原有的疑团,反而又提出了更多的疑问。

1. γ射线爆发特征

爆发的主要特征之一是辐射变化剧烈而迅速,呈脉冲状。通常,一个脉冲结束后,紧接着会有第二个、第三个脉冲出现(脉冲数可以有1至5个)。初脉冲上升时间的典型值为0.2秒,最快的可达毫秒量级。爆发持续时间从0.1秒至100秒。由γ射线爆发的时间特性可以推断爆发源尺度的上限。持续时间越短,爆发源的尺度越小。已经测知某些强爆发源的直径不超过1500千米,其中有一个上升极快的爆发源的直径不超过300千米。γ射线爆发又称γ射线暴或γ暴。

γ射线爆发之间差别很大,最强烈的爆发在其爆发瞬时要比天空中每一个其它γ射线源加在一起都要亮,但是因为不知道其距离,也就不可能知道究竟哪一个爆发最强。

2. 能谱及其两条尾巴

爆发的辐射能量范围从几keV到几MeV,呈指数形的连续谱,随着能量的增加而迅速地减小。在地球处的总能流为$3\times10^{-13}\sim3\times10^{-11}$焦耳/厘米^2。由于不知道爆发源的距离,无法得知辐射功率。如果γ爆发发生在最近的恒星处,其辐射功率将为10^{27}焦耳/秒,比太阳的辐射功率大一个数量级。事实上,γ射线爆发源的距离很可能远得多,因此其辐射功率将比这个值大得多。

在连续谱的高能端,大于1 MeV的光子数比理论预计的要多,即多了一个高能尾巴。当γ射线光子超过2个电子静止质量所对应的能量时,一个γ射线光子就可能转化为一个正电子和一个负电子。电子的静止质量$m_e=9.1\times10^{-28}$克,根据爱因斯坦的质能关系公式$E=mc^2$可求得电子静止能量E_0为8.2×10^{-15}焦耳。1 keV相当于1.602×10^{-16}焦耳,1 MeV以上的高能γ射线光子正好符合这个能量大于$2E_0$的条件。因此,大量的高于1 MeV的γ光子由于转变为正负电子对而丧失,

应该出现连续谱高能端的明显切断。然而,观测并没有发现连续谱的高能端切断,却以幂律谱的形式延伸至 10 MeV(见图 13-17)。这个高能尾巴的发现很重要。表明这些高能光子是来自弱磁场区域。

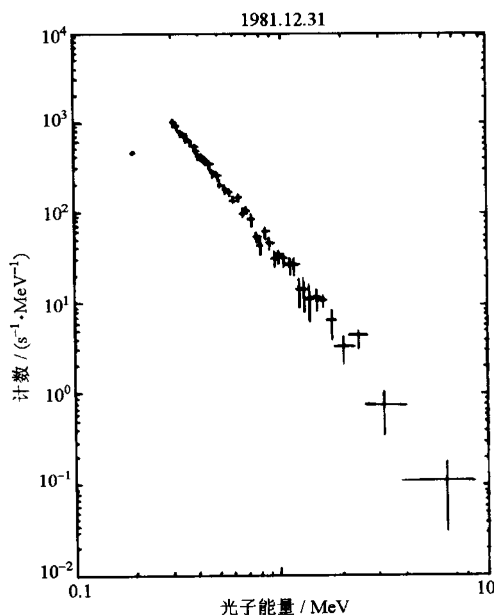


图 13-17 γ 射线暴的高能尾巴

在连续谱的低能端,即软 X 射线段也出现一个尾巴。在 10 keV 以下的低能部分(属于软 X 射线),光度极低,仅有 γ 射线的 2% 以下。但是有的观测发现一些 γ 射线爆发在低能端也有一个尾巴,也就是软 X 射线比较强。软 X 射线的能谱属于黑体谱,可由温度决定。进而可以估计它们的距离为千秒差距(kpc)量级,属于银河系内的天体。

在一些 γ 射线暴中,在连续能谱的背景上观测到一些线谱。约 20% 的 γ 射线暴有吸收线,10% 有发射线,只有极少数具有两种谱线。通常,400 多 keV 的发射线被认为是引力红移的正负电子对的湮没线。正电子和负电子在磁场中相撞后变为两个光子,每个光子的能量等于一个电子静止质量相当的能量,光子的能量 $E = m_e c^2 = 511$ keV。为什么观测

到的谱线是 400 多 keV，而不是 511 keV 呢？这是因为有强大的引力红移的缘故，如果 γ 射线暴源有中子星那样的引力的话，引力红移就导致 511 keV 的谱线红移到 400 多 keV，这表明 γ 射线暴源可能是中子星。

几十 keV 的吸收线通常被认为是强磁场中电子朗道能级间的跃迁所致。图 13-18 为 γ 射线暴 GB880205 的双吸收线能谱，能量分别为 19.3 ± 0.7 keV 和 38.6 ± 1.6 keV，两条谱线的能量恰好是一倍，相应的磁场为 1.7×10^8 T。这正好是中子星所具有的磁场。

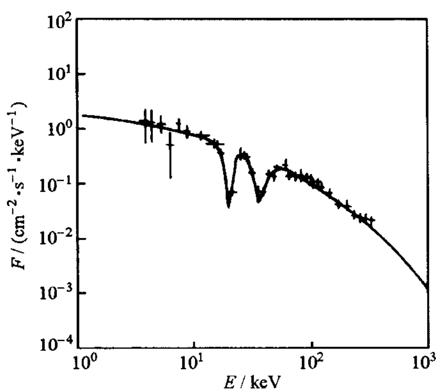


图 13-18　γ 射线暴 GB880205 双吸收线能谱

3. γ 射线爆发源是银河系里的中子星吗？

早期的观测由于空间分辨率太差无法确定 γ 射线爆发源的方位，无法讨论 γ 爆发源的空间分布。康普顿 γ 射线天文台发射之后，分辨率大大提高了，但爆发源的距离至今无法确定。确定距离之所以如此艰难在于当爆发停止后，它就完全消失了，在发生爆发之处找不到任何与之对应的已知天体。因此，天文学家仍无法讨论其真实分布。在康普顿 γ 射线天文台上天以后，至今发现的 γ 射线爆发源已超过 2500 多个，其中很多是弱源。它们的分布显示出非常好的各向同性，图 13-19 给出了 γ 射线爆发的位置和强度的全天星图。一种看法认为 γ 射线爆发源是银河系中的源，很可能是已不辐射射电脉冲的老年中子星，由于它们具有很高的自行速度，已经跑到银河系的各个地方。因此，显出均匀分布。中子星表面上的破裂、爆炸或小行星的撞击均可能引起 γ 射线爆发。这个模型要求银河系的暗晕必须远比太阳离银河系中心的距离大。但是是否存在这个硕大的暗晕，为什么在银道面附近许多中子星并没有产生 γ 射线爆发等问题很难说清楚。

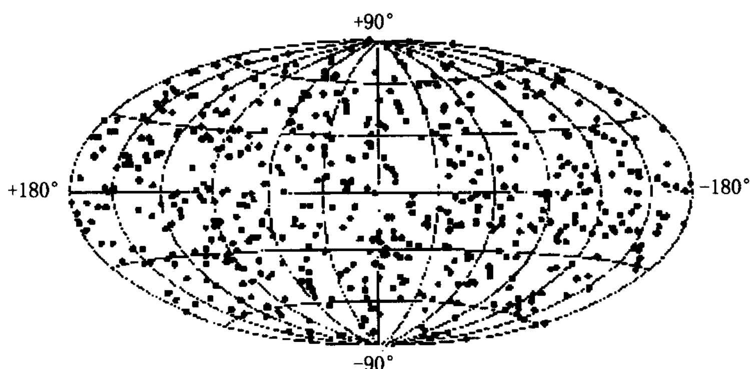


图 13-19 标明 γ 射线爆发发生的位置和强度的全天星图

第二种看法是认为这些爆发起源于彗星之间的碰撞或者起源于恰好在太阳系行星之外的邻近空间所发生的事件。这样可以解释爆发事件的各向同性,但是为什么能产生 γ 射线爆发,却不清楚。第三种就是认为 γ 射线爆发源是河外天体。这种看法认为 γ 射线爆发发生在银河系之外,处在宇宙学的距离上,因此能很好地解释其空间分布的各向同性。但是,遥远的距离导致 γ 射线爆发的能量必须异常地大,每一个 γ 射线爆发相当于超新星爆发的能量。当两颗绕轨道运行的中子星彼此碰撞合并时或是当一颗中子星被黑洞所吞食时在很短的时间里能产生这样异常巨大的能量。

康普顿 γ 射线天文台观测发现的暗爆发的数目比预期的要少很多。由于爆发的视亮度与距离的平方成反比,而含有爆发源的空间体积则与距离的立方成正比,如果发生爆发的天体在空间中是均匀分布的话,远处的弱爆发的数目应比近处的亮爆发的数目要多得多。暗爆发数比预期少这一事实可能表明,爆发局限在一个区域,在这区域以外只有很少的爆发发生,"康普顿"已经看到了这个区域的边缘,地球上的观测者则处在这个区域的中心。这个推论虽然合理,但却也是令人难以置信。

思考和复习题：

1. 试说明 X 射线和 γ 射线在电磁波谱中的位置以及 X 射线和 γ 射线天文学观测的特点。
2. 试说明掠射式 X 射线天文望远镜的原理和它的重要性。
3. 试说明 X 射线双星系统的特点。
4. 试说明 γ 射线爆发的观测特征，评述关于 γ 射线爆发的分布所引发的争论。
5. 简评 2002 年诺贝尔物理学奖得主贾科尼的主要贡献。

第十四讲

宇宙学和微波背景辐射

宇宙是什么？宇宙是如何形成和发展的？从远古时代到今天，人们一直在探讨这些问题。而建立在科学基础上的现代宇宙学是到了20世纪科技发达的时代才开始的。宇宙学是研究整个宇宙演化的学科，不仅是天文学家的重要研究领域，也是物理学家大显身手的学术领域。爱因斯坦率先提出了静态宇宙模型，不到12年就由于哈勃定律的问世而被抛弃。爱因斯坦提出了一个错误的宇宙模型，结果却诞生了一门新的科学——现代宇宙学。当今流行的大爆炸宇宙学由于获得越来越多观测事实的支持而占了上风，其中宇宙背景微波辐射的发现是最重要的支持。1963年初，彭齐亚斯和威尔逊利用射电望远镜进行射电源的绝对测量时偶然地发现了宇宙背景的3.5 K的微波辐射。这种辐射被确认是宇宙大爆炸时的辐射残余，恰好证实了宇宙大爆炸理论的预言。这一发现被公认为20世纪天文学的一项重大成就。由此，他们获得了1978年度的诺贝尔物理学奖。当然，预言宇宙背景微波辐射存在的伽莫夫和寻找这种辐射的先行者迪克教授的卓越的贡献也是不应该忘怀的。

一、αβγ 和大爆炸宇宙学

大爆炸宇宙学说是美籍俄国学者乔治·伽莫夫(G. Gamow)在 20 世纪中期提出来的。他还是一位高产的科普作家。他生性幽默,说自己是在父亲的书房里诞生的,所以写的书很多。对于提出大爆炸宇宙学的重要论文,他也忍不住要开个玩笑。这篇划时代的论文是由阿尔夫·奥尔佛、汉斯·贝泽和乔治·伽莫夫三人署名的,主要人物成为第三作者,他把他的没有参加研究工作的朋友,著名学者汉斯·贝泽的名字写上,作为第二作者,他的学生作为第一作者,目的是拼凑出 αβγ 作者群。



图 14-1　天文学家伽莫夫(右)、阿尔夫·奥尔佛(左)、汉斯·贝泽(中)

在这篇十分著名的论文里提出,我们的宇宙曾有一段从密到稀、从热到冷、不断膨胀的过程。在约 200 亿年以前的宇宙极早期时代,处于极高温度和极大密度下的"原始火球"发生了一次规模巨大的爆炸。此后,宇宙空间不断膨胀,温度不断下降,逐渐地形成了宇宙现在的模样。这个宇宙是有起点的。

1. 大爆炸宇宙论预言宇宙中的氢、氦丰度

在大爆炸的最初 3 分钟,随着温度的逐步下降,相继产生了物质世界各种各样的粒子:光子、电子、中微子、质子、中子等。宇宙早期 3 分钟内就为丰富多彩的物质世界奠定了基础。这个结论似乎很难令人相信。实际上,在宇宙诞生最初那一瞬间极其高温和高密的情况下,粒子碰撞

极其频繁,完成各种反应的效率是异常高的。

要理解宇宙大爆炸最初3分钟产生物质世界的各种粒子这一结论,需要了解如下物理学公认的原理:(1) 爱因斯坦的质能关系。能量和质量是可以相互转换的,由光子可以转换为粒子,粒子也可以转换为光子;(2) 光子和粒子之间的转换规则是光子的能量必须大于2倍的粒子的静止能量,因为光子总是转换为两个粒子:粒子和反粒子,如正负电子对,正反质子对,正反中子对。这些粒子对又可能湮没而转换为高能光子。

在大爆炸极早期,温度极高,充满了高能光子。根据 $E = mc^2$ 公式可以计算出电子、质子和中子的静止能量。质子和中子的质量比电子大近2000倍,所以要求温度要比产生电子的温度高3个数量级,才能发生光子转换为质子和中子的过程,这只能发生在温度极高的大爆炸最初的0.01秒以内,这之后温度下降至1千亿度(10^{11} K)时,就不能产生质子对和中子对了。而且,正反质子和正反中子成对地消失,转换为光子。好在光子转换为质子对和中子对时,由于中微子的存在,粒子和反粒子的数目稍有不同:产生10亿个反粒子,却有10亿零1个正粒子,所以,最后还能剩下一些个别正粒子——质子和中子。

中子在伽莫夫的宇宙中是关键成分,当温度降到 10^{11} K 时,中子失去自由存在的条件,它的平均寿命只有15分钟,它很容易衰变为一个质子和一个电子。我们知道氢原子是由一个质子与一个电子组成的。中子的衰变给宇宙提供了大量的氢。中子还容易与质子结合成氘核,由一个中子和一个质子组成的氘核是氢的同位素。由于氘核不稳定,宇宙中的氘并不多。由2个质子和2个中子组成的氦核很稳定,于是大量氦核形成了,中子藏在氦核里被保护了起来。核物理实验告诉我们,氦核不会分裂,也不愿再接受第5个粒子。在自然界不存在质量数为5的元素。到氦核形成的时代,物质密度已经相当低了,由于氦核与多个粒子碰撞的机会很少,不可能形成其它更重的元素。大爆炸宇宙论的第一个预言就是宇宙中最多的元素是氢和氦,占了99%,氢和氦的比例则为3:1。

观测表明,太阳上的氦丰度约为0.30,银河系的氦丰度是0.29,河

外星系大麦哲伦云、小麦哲伦云、M33、NGC6822的氦丰度分别为0.25，0.29，0.34，0.34等。都在0.25～0.34之间，还没有发现超出这个范围的观测结果。在恒星上发生的核合成过程中氢核可以聚变为氦核，但是由此产生的氦很少，对氦丰度的贡献不会超过0.05。图14-2给出根据大爆炸宇宙学理论计算得到的宇宙演化的历程。

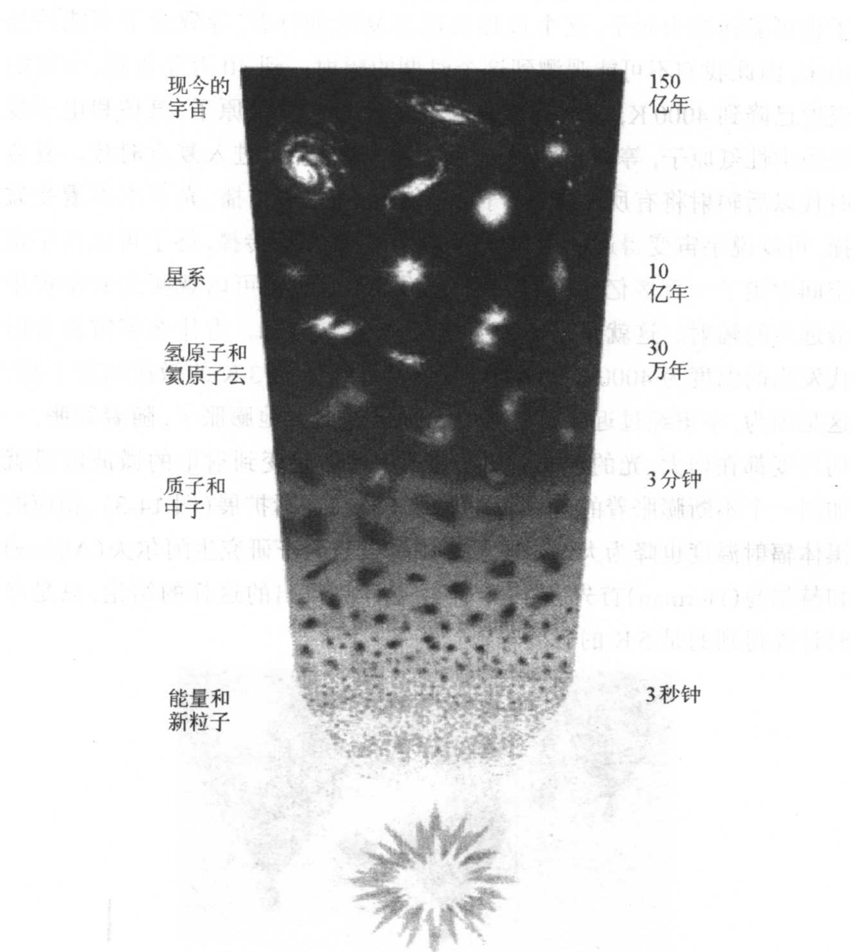


图14-2　大爆炸宇宙学计算得到的宇宙演化历史

2. 微波背景辐射的预言

在宇宙大爆炸后的40万年期间,温度很高,辐射很强,光子充满了宇宙空间,但是这时宇宙中也充满了带电粒子,如质子、电子、氦核等。光子和电子之间的相互作用非常强,光子可以转换为正负电子,正负电子也可能转换为光子,这个过程反反复复地进行着,导致光子不能传播出来,因此我们不可能观测到这个时期的辐射。到40万年以后,宇宙的温度已降到4000 K,这时质子和电子复合为中性氢原子,氦核和电子复合为中性氦原子,等离子体转变为中性气体,宇宙进入复合时代。复合时代以后辐射将有所不同,光子是在中性气体中传播,光子不再遭受碰撞,可以说宇宙变得透明了,光子可以自由自在地传播,终于可以在宇宙空间中走了一百多亿年,到达我们这里,成为我们可以观测到的宇宙中最远古的辐射。这就是宇宙背景3 K的微波辐射。为什么宇宙复合时代发出的温度为4000 K的辐射,到今天已经变为3 K的微波辐射了呢?这是因为,宇宙经过近二百亿年的演化已经大大地膨胀了,随着膨胀,一切尺度都在增大,光的波长也在变长,从可见光变到射电的微波波段就如同一个不断膨胀着的气球表面上的波纹在逐渐扩展(图14-3)。相应的黑体辐射温度也降为大约3 K了。伽莫夫的两个研究生阿尔夫(Alpher)和赫尔曼(Herman)首先在1948年经过计算得出的这样的结论,只是当时计算得到的是5 K的微波辐射。

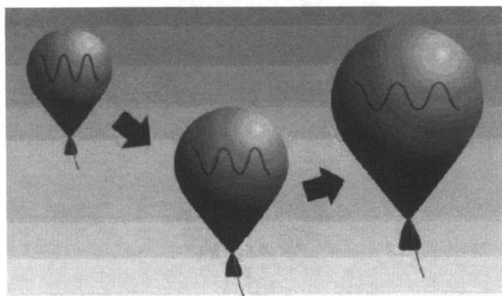


图14-3 大爆炸后宇宙膨胀,辐射的波长越来越长,如同气球表面波纹的变化

既然微波背景辐射是原始火球爆炸后冷却时首次释放出来的辐射，一定具有非常好的热动平衡，具有黑体谱的特征。黑体能吸收全部射入的辐射，然后又把这些辐射再辐射出去，再辐射出来的辐射能分布在整个光谱区，这就是黑体谱的特征。

二、哈勃定律

大爆炸宇宙学的最主要观测依据是哈勃定律。大爆炸后，宇宙是在不断地膨胀，大爆炸后各个天体彼此分离得越来越远，因此在任何一个天体上看到的其它天体都是彼此分离而去的，就如同图 14-4 所示的比喻。因此它们的辐射都会发生红移。

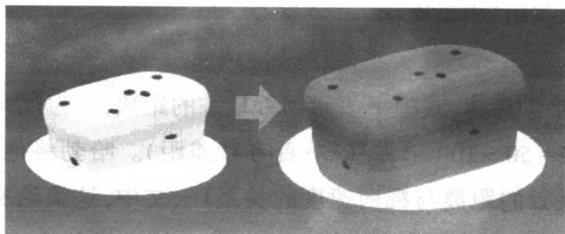


图 14-4　大爆炸后宇宙膨胀，各个天体彼此分离得越来越远，如同面包上的果仁

在银河系的恒星中，有离我们而去的，也有向我们而来的，所以有的恒星的光谱线有红移，有的恒星则有紫移。然而，河外星系的情况就完全不同。哈勃发现所有星系都离我们而去，其退行速度和距离成正比，越远的星系退行速度越大，这说明宇宙在膨胀，宇宙各部分正在彼此远离，它们互相远离的速度随着它们之间的距离的增加而增大。哈勃由此发现了哈勃定律。

1. 星系红移和距离的关系的发现

谱线红移现象是星系和类星体重要特征之一，也是宇宙演化的重要观测依据。红移的值由谱线的观测波长 λ 和在地球上实验室测定的波长 λ_0 来确定，其定义是：

$$z=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}。$$

红移与速度的关系是：

$$1+z=\left(\frac{1+v/c}{1-v/c}\right)^{1/2},$$

其中 c 为光速。在天体的速度远比光速小时，公式可简化为：

$$z=v/c。$$

到 1929 年为止，哈勃得到了 18 个星系以及室女座星系团 4 个成员的光谱和距离。哈勃对这批星系的数据进行了反复的研究，发现所有星系的光谱线只有红移而没有紫移，红移量都比银河系中恒星的红移量大。而且河外星系的距离越远，其谱线红移也越大，视向速度（千米/秒）和距离（兆秒差距）成正比：

$$v=Hr。$$

这就是哈勃定律，式中 r 表示河外星系的距离，v 为视向速度，H 是哈勃常数，$H=50\sim100$ 千米/(秒·百万秒差距)。哈勃将他的研究成果写在《河外星云的距离与视向速度的关系》一文中，这篇论文发表后，很快就得到了天文界的公认。哈勃定律的确立使人类的宇宙观念发生了深刻的变化。以前人们认为宇宙在整体上是静止的，而从此人们认识到了宇宙膨胀的壮观图景：宇宙各部分正在彼此远离，它们互相远离的速率随着它们之间的距离的增加而增大，宇宙在膨胀。图 14-5 是视向速度与距离的关系图。

哈勃定律提出来的时候只用了大约 20 个星系的视向速度和距离资料，红移量都不算大。红移的测定比较容易，而距离的测定则非常困难，因此很难再扩大样本。哈勃最初分析的河外星系离我们都比较近，最远的仅 600 多万光年，其退行速度则不足 1000 千米/秒，对于距离更远、退行速度更大的河外星系而言，哈勃定律是否依然成立？经过 20 年的努力，直到 1948 年才观测到退行速度高达 60 000 千米/秒的长蛇座星系团。对于退行速度如此之大的星系团而言，哈勃定律依然成立。

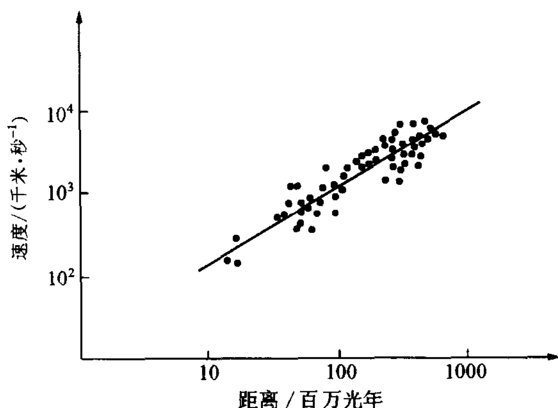


图 14-5 视向速度与距离的关系图

2. 哈勃常数的测定

就原理而论，测定哈勃常数很简单，只需测量一批星系的距离和速度即可。然而，测量距离却相当困难，因此直到现在，天文学家仍然在研究哈勃常数。哈勃空间望远镜的首要观测课题就是测量哈勃常数。

在大爆炸宇宙模型中，当假定宇宙始终在以与现在相同的速率膨胀，哈勃常数倒数的含义就相当于宇宙从其初始直至当今所经历的时间，即相当于宇宙年龄。哈勃常数的单位是千米/(秒·百万秒差距)，由于此单位中的千米和百万秒差距均为长度单位，而且 1 百万秒差距 = 3.086×10^{19}千米，所以 H 值的倒数 $1/H$ 具有时间的量纲。

最早得到的哈勃常数是 500 千米/(秒·百万秒差距)，由此算出的宇宙年龄等于 20 亿年，显然太小，它甚至比太阳系年龄和地球年龄都小得多，这使许多人感到奇怪。后来人们发现，哈勃所取的 H 值偏大，经过许多学者的长期测定，H 值现已缩小到约 50 千米/(秒·百万秒差距)，即已缩小到哈勃当初测定的值的十分之一。于是，哈勃时间从 20 亿年增加到 200 亿年。许多人认为，把此值视为宇宙年龄也许更为合理。

从哈勃定律还引出了一个重要物理量，就是哈勃距离。按照狭义相对论，任何物体的运动速度不可能超过光速，因此哈勃定律中星系退行

速度 v 的上限为光速。退行速度为光速时的距离 D 就是哈勃距离 D_H，当 H 取为 50 千米/(秒·百万秒差距)时，哈勃距离 D_H 约等于 200 亿光年，这是观测者所能见到的宇宙尽头。

三、支持大爆炸宇宙学的几件观测事实

在大爆炸宇宙学提出之后，曾流行一种“稳恒态宇宙理论”与之抗衡。这一理论的主要学者，英国著名的天文学家霍伊尔指责大爆炸理论说：“如果宇宙起始于一次大爆炸，这种爆炸理应留下某种遗迹，请把它们找出来吧！”他本来意在刁难大爆炸理论，却实际上点醒人们，帮了大忙。人们开始注重寻求观测事实的支持。

1. 寻找 100 亿年以前的射电源“照片”

大爆炸宇宙学认为，星系是在宇宙演化的某阶段产生的。在这个阶段之前，没有星系；在这个阶段之后，由于宇宙的膨胀，星系的密度在不断减小，星系的演化又使其亮度在不断地减小。根据这个理论，宇宙发展的各个时期的图像是完全不同的。稳恒态宇宙理论认为，星系的空间密度不随时间变化，在宇宙中处处都是新的星系和老的星系混合在一起，从而保持密度不变。怎样证明谁是谁非呢？

研究宇宙的演化就好像对宇宙进行考古。如果我们能有宇宙各个时期的“照片”，特别是早期的照片，那么星系的分布变与不变一看就会明白，这就如在地球上考古学家是通过挖掘古代遗物化石等来确定年代和当时的自然、社会等情况。人们会认为，要想找到宇宙在 100～200 亿年历史的各个阶段中所留下的遗迹比地球上考古要难得多。但办法还是有的。我们知道，天体的辐射以光速传播，非常快，1 秒钟就要走 30 万千米，可是天体距离太遥远了，传播到我们这里要花费非常多的时间。比邻星是离太阳系最近的恒星，它的辐射到达地球也要走 4.3 年；现在接收到的离我们最近的河外星系大麦哲伦云的光是其 16 万年以前发出的；仙女座大星云的光是 220 万年前发出来的。类星体离我们更远，我

们收到的是它们几十亿年甚至100多亿年前发出的光。宇宙微波背景辐射是最远古的辐射,那时宇宙只有40万年的年龄。更早期的遗留物,如宇宙诞生时的瞬间所产生的氦,这是宇宙诞生后的1个小时内产生的。当今天文学观测所接收到的信息是属于宇宙从诞生时不久一直到现在的各个历史时期发出的。各个时期都有遗留物。

关键的问题是我们的望远镜能不能观测到远在100亿光年以外的天体。在20世纪30年代初期,光学天文望远镜观测到的只是近处的星系,最远也只达到1亿光年左右。1951年开始,英国的马丁·赖尔发展射电天文技术,发明了综合孔径射电望远镜,大大提高了射电望远镜的灵敏度。持续十几年努力,观测到了处在50～100亿光年的距离上的大多数弱射电源。到了60年代射电观测就接近宇宙的边缘了。这也就是说,射电望远镜能够获得宇宙100亿年以前的"照片"。赖尔从1950年起,进行巡天观测以发现射电源,把观测发现的射电源编制成10多个射电源表。赖尔发现,已知射电源的数密度随距离的增加而增多。这说明100多亿年以前宇宙中的射电源比近期的射电源多得多,最多时可达到现在的1000多倍。当距离大到一定程度以后,射电源的数密度又开始减少,这对应于星系形成之前的阶段。赖尔的研究工作成为支持大爆炸宇宙学的重要观测事实。赖尔在1974年因发明综合孔径射电望远镜而荣获诺贝尔物理学奖,但他获奖的原因也还包括他在宇宙学方面的贡献。还需指出,赖尔的射电源观测证明宇宙是在随时间的推移而变化着的,今天的宇宙不同于过去的宇宙。

2. 遥远类星体的红移

类星体是20世纪60年代天文学四大发现之一。这是一种非常奇特的天体,其最重要特性是光谱线发生了巨大红移,比河外星系的红移还大得多。最先发现的2个类星体3C273和3C48的红移值分别为0.158和0.367。后来发现的类星体红移越来越大,1973年发现的射电类星体QQ172的红移为3.53。类星体PC1247+3406的红移值高达4.897。目前,红移最大的类星体是SDSS100+0524,达到6.28。它的速

度竟达到光速的96%。由哈勃定律计算出的类星体距离使人们感到十分震惊:它们都远在几亿光年或几十亿光年以外,甚至达100多亿光年。也就是说,我们目前所观测到类星体的光是几亿年或上百亿年以前发出的。类星体是我们观测到的最古老的天体了。红移特大的类星体已经接近哈勃距离,也就是说快到我们所能观测到的宇宙的尽头。

四、宇宙微波背景辐射的发现

根据大爆炸理论,今天的宇宙温度只有绝对温度几度。20世纪60年代天文学四大发现之一的3K宇宙微波背景辐射的发现,有力地支持这一点。

1. 迪克两失发现良机

伽莫夫、阿尔夫和赫尔曼的微波背景辐射的预言并没有受到学术界的重视,被搁置了十几年。他们自己没有继续研究进一步完善自己的理论,也不关心天文学的观测。实际上,那时已有一些观测显示出存在宇宙背景微波辐射的迹象。

既然宇宙大爆炸复合期留下的辐射到今天已处在射电的微波波段,当然发现这一辐射的观测手段只能是射电望远镜了。在20世纪40年代,射电望远镜所用的天线都比较小,接收机的噪声温度也比较高,因此灵敏度是不太高的。1945年美国麻省理工学院的迪克(R. H. Dicke)研制了一台波长为1.25厘米的射电望远镜,抛物面天线的口径很小,直径仅有45厘米。他用这台射电望远镜观测太阳和月亮的射电辐射。在这样的波段上,地球大气也有辐射,而且还比较强。为了扣除大气辐射的影响,迪克转而对大气在1.25厘米波段上的辐射进行精确的测量,却意外地发现了温度为20K的"天空背景辐射"。他认为,这种辐射并不是来自地球大气,很可能是广泛地分布在宇宙空间中各种星系的射电辐射所构成的一个背景,他把这种辐射称之为"宇宙物质辐射"。实际上,这种辐射就是后来发现的微波背景辐射,只是当时射电望远镜的测量精度

不高，人们对大爆炸宇宙模型也不太熟悉，迪克未能把他的发现和微波背景辐射联系起来。

很有意思的是，迪克关于"宇宙物质辐射"的观测结果和伽莫夫关于"核合成"的一篇论文都发表在1946年《物理学评论》第70卷上，直到20年后，人们才发现这两篇论文之间紧密的关系。如果那时伽莫夫拜读了迪克的论文，很可能会把迪克的观测发现和他们预言的"宇宙微波背景辐射"联系起来。或者如果迪克去读一下伽莫夫等的论文也可能有所启迪。那么发现宇宙微波3K的辐射的机遇就不会留给彭齐亚斯和威尔逊了。迪克失去了一次发现宇宙微波辐射的绝好的机会。伽莫夫他们也错失了验证他们理论的一个机会。

1946年迪克回到他毕业的普林斯顿大学任教。到了60年代初，迪克转向研究宇宙学，但是他不相信伽莫夫提出的大爆炸宇宙学。他心目中的宇宙模型是永久振荡模型，即认为宇宙是反复地膨胀和收缩的，目前的宇宙正处在膨胀阶段。他猜想宇宙在"振荡"过程中会留下可观测的背景辐射。迪克让他的研究生皮布尔斯(P.J.Peebles)计算振荡模型里宇宙温度如何随演化而改变。很有意思的是，他们的结果也认为宇宙中充满着一种温度为10K的背景辐射。迪克终于想起了20年前他发现的温度为20K的"宇宙物质辐射"，认为这种辐射可能就是"振荡"过程中留下的微波背景辐射。1964年，迪克鼓励两位研究生去寻找这种辐射，他们为此研制了射电望远镜，可是还没有来得及正式观测，却有人捷足先登了。那就是后来获得诺贝尔物理学奖的彭齐亚斯和威尔逊。迪克再一次失去发现良机。

还有一个人也是和这次发现宇宙背景微波辐射擦边而过，那就是工程师奥姆(E.A.Ohm)，他是彭齐亚斯和威尔逊的同事。奥姆用贝尔实验室的喇叭天线进行测量时曾发现有3.3K的多余噪声温度，这一测量结果于1961年发表在杂志《贝尔系统技术》上。只是这个多余的噪声温度小于实验误差，而且，这点多余的温度对通讯没有妨碍，因此没有给予注意。

2. 彭齐亚斯和威尔逊的射电天文绝对测量工作

彭齐亚斯1933年4月26日出生在德国慕尼黑的一个犹太人家庭。同年,在他出生后他全家离开德国迁移往英国,后又到美国定居。1954年彭齐亚斯在美国纽约城市学院毕业,获物理学学士。后来进入哥伦比亚大学当研究生,1962年获博士学位。他的导师汤斯教授是一位对微波激射和激光有特殊贡献的物理学家,而且还是分子天文学的创始者。彭齐亚斯研制了一个21厘米波段上的微波激射放大器,目的是要观测星系际氢原子的一条波长为21厘米的谱线。虽然没有成功,但他和汤斯一起在射电天文研究上的尝试,使他念念不忘射电天文。1961年他在获得博士学位之前就到贝尔实验室工作,从此开始了他对射电天文学的追求。

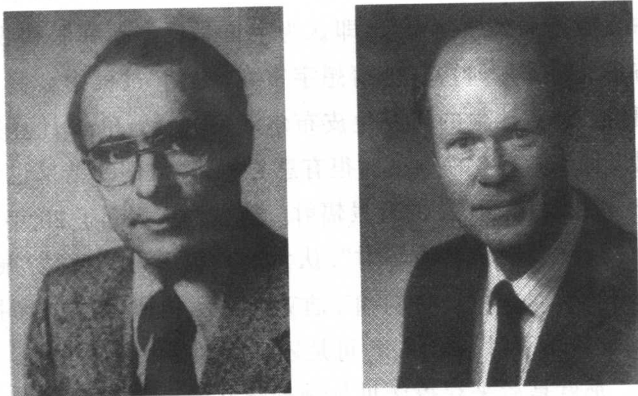


图14-6 天文学家彭齐亚斯(左)和威尔逊(右)

威尔逊1936年1月10日出生于美国的休斯敦,从小就对电子学有兴趣,1957年在赖斯大学获学士学位,所有课程的成绩都属优秀。1962年在加州理工学院获物理学博士学位。他的博士论文是对银河系进行射电巡查,绘出氢气体云的分布图。他对自己的论文不甚满意,因为澳大利亚的天文学家已在这之前完成了类似的观测。但是,通过做博士论文,他结识了许多射电天文学家,特别是从此爱上了射电天文学。1963

年进入贝尔实验室工作。贝尔实验室是射电天文学诞生和发展的摇篮，射电天文学奠基人央斯基(K. Jansky)就是在这里发现来自银河系的射电辐射的。

彭齐亚斯和威尔逊都是向往贝尔实验室的射电天文研究条件先后来到这里的。1960年，贝尔电话公司为了执行通信卫星的计划建造了一具口径为6.1米的喇叭型反射天线，见图14-7。这种天线具有非常高的方向性，几乎不受来自地面的无线电和热辐射干扰。这个天线和一台低噪声微波辐射计一起用来接收“回声”系列卫星上反射回来的信号。这些卫星实际上是一些比较大的金属球，能反射射电信号，靠这种反射功能而进行世界各地的通讯。由于卫星上没有放大信号的装置，反射回来的信号十分微弱，所以要求地面上有很好的天线和放大系统来捕捉金属球反射来的微弱射电信号。喇叭型反射天线性能优良，而微波辐射计的放大系统所采用的红宝石脉塞微波放大器用液氦冷却到4.2 K以下，噪声很低。喇叭天线和这种微波辐射计一起组成了一台灵敏度很高的射电望远镜。没过几年有了通讯卫星，这台放置在克劳福德山上的射电望远镜就失去了作用。彭齐亚斯和威尔逊如获至宝，获准用它来进行射电天文研究。

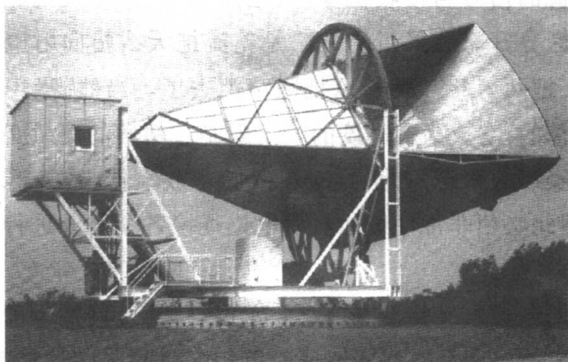


图14-7　贝尔电话公司的喇叭天线，
彭齐亚斯和威尔逊用它发现了宇宙背景微波辐射

1963年，彭齐亚斯和威尔逊开始用6.1米喇叭型反射天线接收系统

进行射电天文射电源的绝对测量,也就是绝对定标。天体的射电流量密度是天体射电辐射的最基本特征。然而,要准确地测量出它们的流量密度却不容易。射电天文观测的定标有两种:绝对定标和相对定标。绝对定标就是用绝对方法测量出射电源在各个频率上的流量密度;相对定标则是采用与已知标准源比对的方法来确定射电源的流量密度。如果有了一批经过绝对定标的射电源,那么就会对以后的射电天文观测提供非常便利的条件。

绝对定标中最关键的事是测定天线的有效接收面积,这在天线工程中也是非常困难的。但是,喇叭天线却是"绝对测量"理想的天线,因为它的灵敏度和接收面积可以精确地计算。这一点是常用的抛物面天线不具备的。6.1 米喇叭天线的接收面积虽然不大,但可以精确测量一批比较强的射电源的流量密度,作为标准源。特别是,原来放置在距喇叭天线约 1 千米处的一台发射机,还可以用来作辅助的测量。

彭齐亚斯和威尔逊为了进行绝对测量,首先对喇叭天线的有效接收面积进行了精密测量。还研制成一台波长为 7.35 厘米的低噪声脉塞放大器。为了用射电望远镜测量一个地球之外的射电源的强度,必须把这个来自射电源的信号与接收机噪声、地面噪声、地球大气噪声以及天线本身的噪声区分开来。采用的方法是轮流把天线指向射电源和源附近的天空背景,把两者相减就可以把噪声消去了。当然,噪声功率本身的起伏是去不掉的,它成为灵敏度的一个限制。精确的测量必须要弄清楚望远镜系统噪声的来源,如天线、波导、脉塞放大器、转换器等等对噪声的"贡献",因此必须非常仔细地对射电望远镜各个部分进行精确的测量和检查。

彭齐亚斯和威尔逊并没有刻意要发现点什么,只是为了对几个射电源进行精密的绝对测量而精心地把射电望远镜装置调整得尽可能地好。正是这一决定性的步骤为他们偶然发现宇宙微波背景辐射准备了条件,这个偶然寓于必然之中。

3. 宇宙微波背景辐射的发现

天体射电源的辐射非常像一个热电阻产生的噪声，因此射电望远镜接收到的辐射往往用相同噪声功率的电阻温度来表示。这个等效的噪声温度正比于接收功率。辐射计中通常包含有由已知温度的电阻组成的校准噪声源。

1964 年 5 月，彭齐亚斯和威尔逊开始了他们的射电天文绝对测量研究。他们所研制的辐射计装备了噪声非常低的红宝石微波激射器，因此灵敏度有了保证。在正式工作之前，必须精确测量天线本身和背景的噪声，为此他们把天线与一个参考噪声源相比较。他们采用液氦致冷的一段波导管作参考噪声源，因此噪声温度很低。

在对准没有射电源的天空时测得的噪声温度为 7.5 K。扣除大气贡献的 2.3K 和来自地面及天线四壁贡献的 1 K，还剩下 4.2 K 的温度。无论天线指向什么方向，也不管是哪一天的观测，这个剩余的噪声总是存在，既无周日变化，也无季节性变化，使他们十分烦恼。因为不把原因找出来，就无法进行射电源的绝对测量。最初他们怀疑是天线和接收机系统的问题，便着手对天线进行了彻底的检查，检查了接收机的各个部件，清除了天线上的一个鸽子窝，结果情况没有变化，剩余的噪声还是存在。排除了来自射电望远镜本身的可能性后，他们继续考察原因：是否可能是来自银河系晕及射电点源的贡献？或者对大气的噪声贡献估计不足？彭齐亚斯和威尔逊用了差不多一年的时间，细心查证或实验。结果证明这个剩余的噪声不是银河系晕，也不是射电点源及大气的贡献。最后，他们在 1965 年进行了一次更为小心翼翼的测量以确定接收到多余的噪声温度是不是来自地面的辐射。他们用喇叭天线测量放置在地面上不同地方的发射机发射来的电磁波，特别是对天线方向图的后瓣进行重点的测量。结果发现天线后瓣所接收到的辐射和预期的一样低，表明地面对天线噪声温度的贡献可以忽略不计。排除了种种可能的因素以后，只能认为剩余的噪声是来自宇宙空间中的一种辐射。

根据他们第一次公布的数据，可以看到他们对天线各项噪声的等效

温度作了具体分析：大气辐射温度为 2.3±0.3 K，天线和波导器件损耗温度为 0.80±0.14 K，后瓣温度小于 0.1 K，以 0.1 K 计算。这样算来，天线的等效噪声温度只有 3.2±0.7 K。把总的天线温度 6.7±0.3 K 减去上述各项噪声源的温度，多余的噪声温度为 3.5±1 K。这个多余的噪声温度是各向同性、无偏振和没有季节变化的。1 K 并不是测量误差，它是把每项来源的最大误差加起来的结果。实际的误差大约为 0.3 K。

彭齐亚斯和威尔逊发现了“多余的噪声温度”，但却不知道这是什么，甚至当别人告诉他们，可能是宇宙背景微波辐射后，还不相信。戏剧性的是，在他们实验站附近的普林斯顿大学的实验天体物理学家迪克此时正在领导着一个小组进行旨在寻觅宇宙背景微波辐射的工作。为此他们专门研制了一台波长为 3.2 厘米的射电望远镜，可是还没有来得及观测，就听到彭齐亚斯和威尔逊已经发现了他们梦寐以求的宇宙背景微波辐射。当然，他们很快就观测到这种辐射，仅仅慢了一步。迪克虽然感到遗憾，但他对彭齐亚斯和威尔逊的发现赞叹不已，其兴奋程度甚至超过了发现者。不管是谁发现宇宙背景微波辐射，宇宙演化中的一个大问题终于解决了，这是每一个天文学家都要庆祝的。他们没有任何嫉妒之心，反而伸出友谊之手帮助与自己竞争的胜利者。

迪克和他的同事们来到克劳福德山，与彭齐亚斯和威尔逊进行交流。迪克小组相信彭齐亚斯和威尔逊测量到的正是他们要寻找的宇宙微波背景辐射。双方商定同时在《天体物理杂志》上发表自己研究结果的简讯。一篇是迪克小组的理论文章“宇宙黑体辐射”，另一篇是彭齐亚斯和威尔逊题为“在 4080 兆赫上额外天线温度的测量”的实验报告。在这篇报告中只说“发现的额外噪声温度约为 3.5 K。这个额外的温度是各向同性的，非偏振的，并且没有季节的变化”，不谈与宇宙背景微波辐射的可能联系。只有把这两个各自独立的研究结果一起读完才能体会出这一观测发现在宇宙学方面的重大意义。

彭齐亚斯和威尔逊仅 600 字的论文，被认为是继 1929 年哈勃发现星系红移现象之后的天体物理上的又一重大发现，是对宇宙大爆炸理论的有力支持。

4. 微波背景辐射特征的确认

从1965年彭齐亚斯和威尔逊发表发现宇宙微波背景辐射到1978年瑞典皇家科学院把诺贝尔奖授予这两位科学家，一共经历了12年的时间。这项发现之所以登上科学上荣誉的顶峰，不仅有在他们之前的诸如伽莫夫、阿尔夫、赫尔曼、迪克等在理论和观测上的贡献，还有在确认“多余的噪声温度”的来源之后，一批天文学家进一步证认的结果。

根据理论分析，不同频率的光辐射能量密度分布应服从普朗克定律，也就是黑体谱。因此检验这种辐射在不同波长的能量密度是否符合普朗克分布定律，是对天线的多余温度问题用宇宙学起源解释的一个重要考验。

1965年所发现的宇宙微波背景辐射是在波长为7厘米上的观测结果，为了证实这种辐射是黑体谱，需要在70厘米到毫米波的广阔的频段范围上进行测量。1965年12月，迪克小组的罗尔和威尔金森完成了他们在3.2厘米波段的测量，结果是3.0±0.5 K。不久，豪威尔(T.F. Howell)和谢克沙夫特(J.R. Shakeshaft)在20.7厘米上测得2.8±0.6 K。随后彭齐亚斯与威尔逊在21.1厘米上测得3.2±1 K。但从3 K黑体分布理论曲线看出，辐射强度峰值在波长为0.1厘米附近。从以上测量迪克只能拟合部分理论曲线。当务之急是要取得比0.1厘米更短的波长处的观测资料。这一波段已属于远红外波段，由于地球大气的吸收，在地面无法获得这一波段的资料。康奈尔大学的火箭小组和麻省理工学院的气球小组分别在1972年进行了观测，证实在远红外区域背景辐射有相当于3 K的黑体辐射分布。1975年，伯克利加州大学伍迪(D.P. Woody)领导的气球小组给出从0.25厘米到0.06厘米波段的背景辐射处于2.99 K的分布曲线范围内。观测数据已肯定宇宙微波背景辐射有大约3 K的黑体谱。

1989年美国宇航局发射了专用的宇宙背景探索卫星(COBE)，获得重要进展，观测到的微波背景辐射谱与温度为2.726 K的黑体辐射谱符

合得很好(见图 14-8)。这种辐射表现为很均匀,呈高度的各向同性,说明宇宙是相当均匀的。

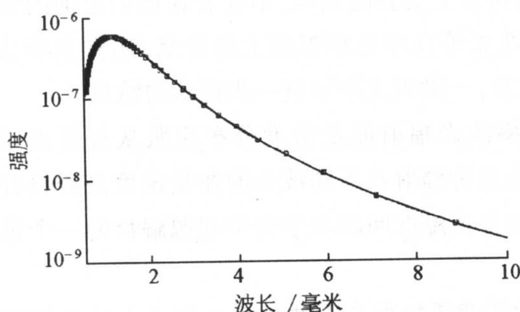


图 14-8 美国宇航局宇宙背景探索卫星获得的微波背景辐射谱特性与 2.726 K 黑体谱非常符合



图 14-9 天文学家乔治·斯姆特

不过,根据宇宙大爆炸理论,这种辐射仍应有一点点各向异性。乔治·斯姆特(图 14-9)认为,这种不均匀性可以导致在大爆炸后星系的形成。他计算得到这种不均匀性的分布,如图 14-10 所示。最新的观测给出了宇宙背景微波辐射在数弧分的几何尺度上起伏的上限是 $\Delta T/T<2\times10^{-6}$。新的观测希望能发现这种各向异性。

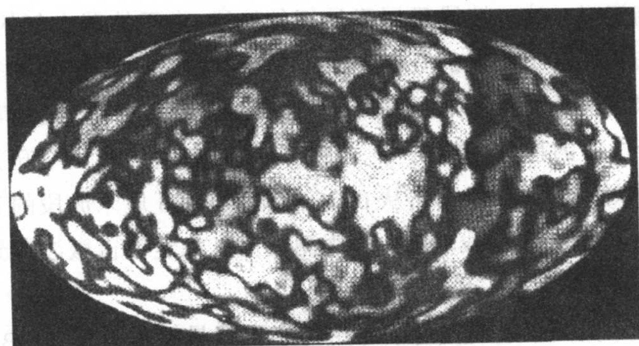


图 14-10 计算机绘制的显示宇宙背景辐射不均匀的分布图

五、暗物质和宇宙的未来

大爆炸宇宙学确认我们的宇宙正在膨胀之中，那么，是否会一直膨胀下去呢？由哈勃定律中的哈勃常数可以估计膨胀的速率。如果这个速率不变，那我们的宇宙确会一直膨胀下去，天文学家把这种情况称为开放的宇宙。第二种可能则是宇宙膨胀的速率不断减少，最终达到零膨胀，在这之后整个宇宙将在自己的引力作用下开始收缩，就如同星云收缩为恒星的过程一样，最后变为大爆炸前的状况。天文学家把这种情况称为振荡的宇宙，它是一个封闭的、有边界的宇宙。现实宇宙究竟是其中的哪一种取决于对宇宙膨胀是否会减速的测量，它可以通过哈勃关系来求得，但是很难测准确。

宇宙中有数以千亿计的星系，每个星系中的成员都是依靠引力吸引而聚集在一起的，由几十到几千个星系组成的星系团也是由引力而形成的。各个星系之间或星系团之间的距离特别大，相互之间的引力已是十分微弱。彼此之间不会有足够大的吸引力以保持彼此之间的距离不变，速度比它快的远离它，速度比它慢的也相对地远离它。因此，从任何一个星系上看其它星系，都会导出与哈勃定律相同的结论。星系之间引力不大，它虽不能阻止膨胀，但引力总是有一定影响，导致宇宙膨胀的速率越来越慢。是否能使膨胀速率逐步变为零归根结底取决于宇宙中究竟有多少物质。

按照目前的观测，宇宙中的平均物质密度是比较低的，预期宇宙的膨胀将一直继续下去。然而，宇宙中暗物质的存在将会使平均密度大大地提高。因此，暗物质的寻找就成为现代宇宙学研究中一个非常活跃的领域。暗物质到底有多少，这关系到宇宙总质量的大小，关系到未来的演化。

在过去的数十年中，天文学家已经知道在宇宙中有很多物质几乎不辐射电磁波，把它们称之为“暗物质”是最恰当不过的。这些暗物质观测不到，但却可以通过它们的引力所产生的作用觉察到。观测结果揭示了

一个非常惊人的事实，大多数星系被构成一巨大物质晕的暗物质所包围。在一个星系中，没有辐射但有引力作用的暗物质至少占整个星系的90%以上。我们的银河系的情况就是这样。

星系团中星系之间的暗物质也是非常多的。由于引力的作用，星系团中的各个星系紧密地联系在一起，如果仅仅用可以观测到的明亮的星系来计算，它们的引力作用不可能使星系团如此紧密地联系在一起。这表明暗物质的存在。可以毫不夸张地说，宇宙中处处都有暗物质，而且它们超过整个宇宙物质90%的比例。

在1993年，天文学家对邻近的星系大麦哲伦云中的大量恒星进行监测，观测这些恒星在几天中亮暗的情况。他们认为，如果在这些恒星和我们之间存在一个大质量的暗天体，它将起着一个透镜的作用，恒星的光将被弯曲，使得这个恒星暂时性地增亮。这样的"增亮剂"暗天体已发现十几个。这种暗天体被称为大质量致密晕天体(MACHOs)，它们很像是由重子组成。1996年，一组天文学家宣布新的观测结果，指出银河系中的暗物质有50%以上是大质量致密晕天体，而且很可能是由燃烧殆尽的恒星形成的。

暗物质与中微子可能有着重要的关系。在宇宙中存在着大量的中微子，在宇宙大爆炸初期就产生了极其大量的中微子，其数量大大超过质子和中子。恒星内部的核反应又无时无刻不在产生中微子。大量中微子的存在是否构成宇宙中的暗物质，关键在于中微子有没有质量，如果有质量，即使是微乎其微，那它们的总质量也是相当可观的。

有的天文学家认为，暗物质是诸如黑洞、木星类行星、辐射束没有朝向我们或死亡了的中子星。也有人认为是由质子和中子组成的宇宙原始物质，或是某种人类从未发现的那些理论物理学家所梦想的稳定的新粒子。

总之，暗物质成为21世纪的一个重大的科学课题。它的研究进展直接与我们的宇宙的未来演化紧密相关。究竟是开放的宇宙还是封闭的宇宙目前尚不能定论，但比较多的天文学家倾向于我们的宇宙中拥有足够多的物质，到一定的时候宇宙的膨胀将会停止，我们面临的是一个振荡的宇宙，一个封闭的、有边界的宇宙。

思考和复习题：

1. 试叙述大爆炸宇宙学的要点和其主要的观测依据。
2. 什么是射电天文观测的绝对测量？
3. 叙述宇宙微波背景辐射的发现过程和这一发现的重要性。
4. 评述彭齐亚斯和威尔逊荣获诺贝尔物理学奖，你最深的感受是什么？

第十五讲

地外生命和地外文明的探索

地外生命和地外文明是人们长期以来津津乐道的话题,大量有关外星人的科幻小说和电影,把地外文明炒得沸沸扬扬。然而,它却是一个严肃的科学问题、哲学问题,一个需要思考和探索的问题。地球上生机勃勃、五彩缤纷的生命世界使人们期望在地球之外、太阳系之外寻找生命和与人类智能相当甚至超越人类的生物。虽然,在太阳系内探测结果令人失望,没有找到生命的存在,但天文学家并没有放弃,继续以寻找行星和它们的卫星有没有生命赖以生存的水为中心的探索和考察。同时,天文学家扩大范围寻找太阳系之外的行星,特别是其中与地球类似的行星。自 20 世纪 50 年代,人类开始挑战宇宙航行以来,地外生命的探索始终是空间探测的一项重要内容。人们正在期待有突破性的进展。

一、太阳系中的生命探索

人类不愿意孤独,期盼在地球之外找到知音。地球环境适合生命的繁衍和成长,太阳系中的其它行星及其卫星上有没有类似的条件?有没有人类的兄弟姐妹,抑或简单的生命?这成为令人类牵肠挂肚、魂牵梦

绕的研究课题。

1. 人类的家园——地球

地球是我们人类居住的地方，大地母亲得天独厚的优越条件抚育了她怀抱中的万物和生灵，也造就了现代人类社会的高度文明。美丽的地球是我们人类的家园（见彩图1,2,3）。

地球诞生于46亿年之前，这是人们根据地球上放射性元素的衰变情况得出的科学论断。地球刚刚形成的时候，温度较高，大气中的氧气也很少。几亿年之后，地球表面逐渐冷却，形成地壳。由于地表温度降低，大气中的水汽得以凝结变为雨水降到地面，流到低洼处形成海洋。在阳光的照射下，一部分水变成了氧气和氢气。地球变成了适于生命诞生和存活的星球。大约在40亿年前，地球上开始出现生命，先在海洋里，然后到陆地，先是低级的，然后发展到高级，经过几十亿年的漫长岁月，一步步演变进化，最后终于形成了今天这样生机勃勃、五彩缤纷的生命世界。

地球是我们人类的家园，也是太阳母亲九个儿女中普通的一员。地球又大大地不同于它的八个兄弟姐妹，因为地球上一片生机勃勃的景象是太阳系中独一无二的。为什么地球能孕育出包括我们人类在内的万物生灵？这是因为它的条件得天独厚，太阳系的其它行星都不能和它相比。

“万物生长靠太阳”，如果没有阳光也就没有我们人类和地球上其它生命的繁衍生息。地球与太阳的平均距离是1.5亿千米。按照与太阳的距离从近到远排列，地球排第三，距离适中，因此得到的太阳光也适中，使地球上的温度不太冷，也不太热，为各种生命的存活提供了基本条件。太阳系的其它行星，不是太热就是太冷。水星是内行星，离太阳最近，太阳光照到的地方温度高达300℃以上，而背着太阳的那面则在-180℃以下。金星比水星离太阳远一些，但表面温度却高达480℃，而且不分白天黑夜，也不分赤道两极，到处都是地狱般的高温世界，任何生物都决不可能在那里生存，这是由于金星浓密的二氧化碳大气的温室效

应所致。外行星中,火星离地球最近,它的表面温度比地球低得多,在赤道附近中午也只有-10℃左右,晚上又会降到-50℃。在火星两极地区,夏季气温只有-70℃,冬天则会降到-110℃以下。木星和土星属于液态行星,木星大气的温度为-140℃,土星大气的温度更低。

在恒星世界里,太阳质量偏小,也不够亮。如果有一颗比太阳亮25倍的恒星,那么类似地球条件的行星就应该处在相当于木星环绕太阳运转的距离上。而对于一颗亮度只有太阳的十分之一的小恒星来说,类地球行星的轨道将类似于水星的路径。

仅有离恒星合适的距离是不够的,如果行星的质量太小,像月球一样,引力就不能够维持住海洋和大气层。而如果没有大气层,地球上同样不会有我们人类和其它生命的繁衍生息。地球的表面被一层厚厚的大气包围着,大气层没有明显的边界,只是愈向上愈稀薄。大气是由多种气体组成的混合物,主要成分是氮气和氧气,还有少量的氦、氩、氪、二氧化碳、水蒸气等。大气的总质量约5000万亿吨,只有地球质量的百万分之一。而这些大气的98%又都集中分布在距离地面50千米以下的范围内,我们平常所说的大气层也是指的这个范围。

水是生命孕育和发展的必要条件,地球上的水资源十分丰富,由于地球引力阻止了水蒸气逃离地球,而通过水的蒸发—云彩—降雨的循环过程,提供了充足的人类及其它生命生活和发展所需要的水。

2. 地球的生命来自彗星和陨星吗?

太阳系里的彗星很多,据天文学家估计太阳系彗星多得要以亿来计数,目前已经观测到的约有2000颗。彗星每次经过太阳附近时,彗核中都有很多物质被太阳辐射蒸发出来形成彗尾。当彗星远离太阳时,彗尾就逐渐消失了,但其中的尘埃物质并没有回到彗核里,而是遗留在彗星的轨道上成为流星群。当地球穿过彗星轨道时,这些由碎块和尘埃组成的流星群被地球的引力所吸引而穿越地球大气,形成了流星雨现象。彗星的物质曾大量落到了地面,彗星物质的化学组成就成为科学家极为关注的事情。

对彗星的观测也是鼓舞人心的。1986年哈雷彗星回归的时候,苏联

和欧洲的两艘宇宙飞船飞近哈雷彗星，探测到彗星在其冰层中含有有机化合物(图 15-1)。由彗星的光谱分析知道，彗星主要由水、氨、甲烷、氰、氮、二氧化碳、甲基氨的分子组成。

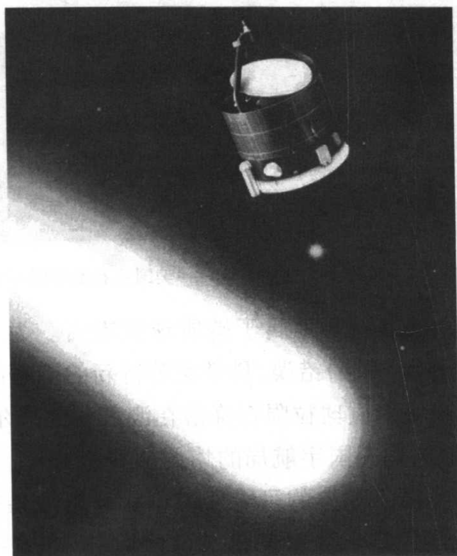


图 15-1　欧洲空间局的“乔托”号彗星探测器靠近哈雷彗星

流星体、近地小行星，还有彗星，陨落到地球上，都叫陨星或陨石。落到地球上的陨星是非常多的，每年落下的总质量有 20 万吨之多。图 15-2 是美国亚利桑那陨石坑。陨石按其本身的成分可以分为石陨石、石铁陨石和铁陨石几大类。其中石陨石占全部陨石的 92%。石陨石又分为球粒和非球粒两种，其中球粒陨石又占全部陨石的 84%。

陨石是来自空间的使者，我们可以在实验室利用先进的仪器分析它们的成分。在这方面所取得的成果也是令人鼓舞的。

早在 19 世纪，人们就开始研究陨石的成分。1840 年化学家分析了 1838 年降落在南非的陨石，得到与植物枯叶腐烂后的腐殖质相似的有机物。100 多年后再次分析这块陨石，又发现其中确实含有氨基酸、核酸盐、碳氢化合物。1965 年在陨石中发现与人的指纹、灰尘等物质中氨基



图 15-2 世界最大的陨石坑——美国亚利桑那陨石坑

酸相似的氨基酸。这类陨石是属于碳质球粒陨石。为了避免地球物质污染陨石而造成分析结果的错误,科学家等待新的陨石的降落。1969 年 9 月 28 日终于有一块碳质球粒陨石降落在澳大利亚墨尔本的附近,这块陨石被小心翼翼地送到美国宇航局的埃姆斯研究中心,先将陨石外部剥离,再分析中心的物质。污染的可能性很小。分析结果表明陨石中含有甘氨酸、丙氨酸、谷氨酸、天冬氨酸等。这些成分中,有一些是地球上所没有的,从而说明不是污染造成的。碳质球粒陨石中存在有机物得到确认。

有的科学家估计,大约在 40 亿年以前,地球和月球经常受到彗星和陨石的袭击。在地球生命开始的第一个 10 亿年里,可能有 10 万多个彗星撞到地球上,带来了大量的彗星上的有机物,比现在地球上的所有的生物的总质量要大一万倍。现在有一种理论,认为地球上的生命的先驱是由彗星带来的。而且相信,地球上的大部分水也是早期由彗星带来的。

有一块 1984 年在南极洲艾伦山地区找到的编号为 ALH84001 的陨石,在 1996 年被分析认定是来自火星的陨石(见图 15-3)。更令人激动的是,美国科学家通过电子显微镜和扫描电镜的详细观察,发现在 ALH84001 中,有一种由碳酸盐组成的微细管状结构,其直径比人发直径的 1% 还小,这是 36 亿年以前火星上存在的原始微生物的化石。36 亿

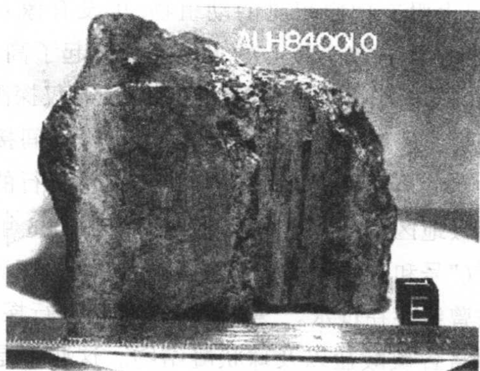


图 15-3　来自火星的陨石

年以前地球上的生命也刚刚处于最原始的演化阶段。说明火星与地球的生命起源与初始演化似乎是同步的。

这样的陨石是如何从火星出发而到达地球的？原来，太阳系中的小天体(例如小行星、彗星)撞击火星时，火星表面的一些岩石被溅射到太空中，这些岩石的速度超过了火星的逃逸速度时，就摆脱火星的引力而飞到太阳系空间运行。当它们跑到地球运行轨道附近时就会在地球引力的作用下降落到地球表面，成为陨石。地球南极地区气候寒冷干燥，厚厚的冰层终年不化，降落到那里的陨石经过几百万年甚至几千万年以后仍然保持得非常完好无损。

近 20 多年以来，人们在南极洲一共找到了 1 万多块陨石，其中至少有 10 块被认定是来自火星的。而在这 10 块火星陨石中，ALH84001 又是最古老的一块，这是美国一位名叫斯科尔的地质学家在 1984 年找到的，也是当年在艾伦山地区找到的第一块陨石，重 1.9 千克。

3. 寻找太阳系内的生命

在太阳系里寻找地球之外的行星和卫星上的生命过程一直是天文学家追求的目标。虽然有过关于火星生命的种种猜想，如火星人、火星运河、火星人发射人造卫星等，但是经过对火星表面和大气进行精心的观测和分析，特别是宇宙飞船“海盗”号和“火星探路者”等亲临火星进行

考察，肯定了火星上没有肉眼可见的动植物，更没有像人类一样的智能动物。2001 年以后，以找水为核心的火星探测掀起了高潮，取得了令人兴奋的结果。2001 年美国“奥德赛”绕火星飞行，不仅探测到火星表面在历史上有水的证据，还发现火星南极有大量氢分子，间接地表明那里有冰冻水的存在。2003 年欧洲空间局发射的绕火星飞行的“火星快车”探测器发现火星南极地区存在大量的冰冻水。美国 2003 年 6 月 10 日和 7 月 7 日发射“勇气”号和“机遇”号火星漫游车，初步的探测就发现一些证据说明火星过去曾经存在过水。“机遇”号对岩石进行探测和化验后，发现陨石坑岩层中富含硫酸盐以及球状凝结物。这些都是岩石在潮湿环境下形成的迹象。“勇气”号还发现“哥伦比亚”小山脚下岩石中含有赤铁矿。按照地球上的赤铁矿形成与水有关的环境特点来推断，可以认为火星上曾有过水。但是，并没有发现任何生命存在或曾经存在的迹象（图 15-4）。



图 15-4　至今，人类尚未在火星上发现任何生命的迹象

当然，到现在为止仅仅探测了火星极少的地区，远没有到下结论的时候。

在太阳系内被认为对生命发生和发展具有较好条件的还有土星的第六个卫星，木星的第二个卫星，即土卫六和木卫二。经过对木卫二的考察，包括宇宙飞船“旅行者”号飞临土星和木星上空时的考察，以及“伽

利略”号对木星详细地作考察,未发现生命的迹象(图 15-5,15-6)。

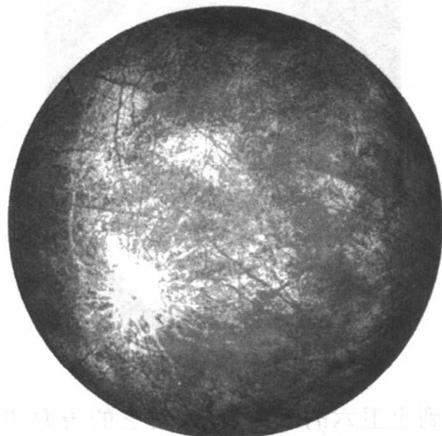


图 15-5 “伽利略”号拍摄的木卫二,人们希望能够在那里找到生命

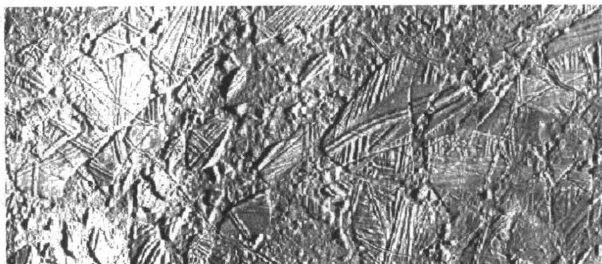


图 15-6 “伽利略”号拍摄的木卫二表面的精细结构

土卫六是与原始地球条件很相似的一个星球(图 15-7)。2004 年 7 月 1 日到达土星的“卡西尼”号将对土卫六作深入的考察。一方面利用“卡西尼”十多次靠近土卫六的飞行,在离它比较近的距离上进行拍照,“卡西尼”所携带的 ISS 照相机比哈勃空间望远镜图像分辨率高得多,有可能获得很好的图像。最近距离的一次是离土卫六 1200 千米,将利用多种仪器包括可见光和红外成像光谱仪,将得到土卫六的大范围表面图像,还将进行雷达实验,将探明土卫六大气的稀薄程度。

最令人期待的是,“卡西尼”号携带的配备了 6 种科学仪器的小型飞

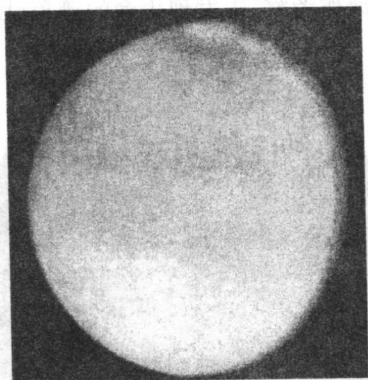


图 15-7 “旅行者”号拍摄的土卫六

船“惠更斯”，将要到土卫六的表面着陆，对它的表面和大气进行实地考察。2004 年 12 月 25 日，“惠更斯”已经成功地与“卡西尼”号分离。在到达土卫六表面之前，“惠更斯”先要在土卫六的大气层中飘泊 22 天，采集土卫六大气样品和粒子，测量大气温度、气压和密度，风向和风速，以及检测像闪电那样的电磁信号(图 15-8)。它的雷达高度计将研究土卫六表面的地形、粗糙程度和电的特性。“惠更斯”将在降落时拍摄表面和大气的照片和光谱，测量表面的反射率和成分，探测器的旋转拍摄将可能拼接出土卫六表面的一张图像。“惠更斯”在登陆以后，将直接测量土卫六表面的物理特性和成分。

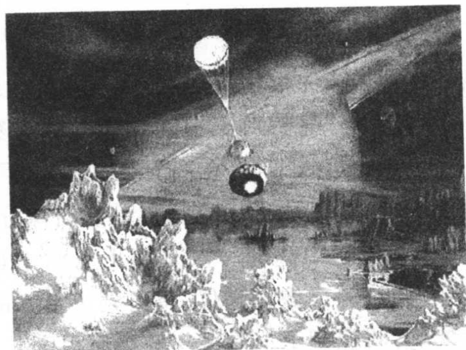


图 15-8 “惠更斯”号将在土卫六大气中飘泊 22 天，采集大气样本(美术作品)

二、地外生命存在可能性的探讨

天文学家致力于在太阳系其它行星和卫星上寻找生命的努力至少已经得到一个结论:在太阳系中只有地球上有智慧生命存在。很自然,要回答银河系中有多少文明社会存在的问题,首先要探讨银河系中有多少"类地球行星"。

1. 宇宙中的有机分子

生物进化研究表明,高级生物是由低级生物进化而来的。生命物质是由无生命物质转化而来的。星际分子的发现给宇宙生命起源提供了重要的依据和启发。各种分子有其特有的光谱谱线,大多数分子谱线不在可见光波段,而是在射电天文的厘米和毫米波段。自 60 年代以来,射电天文学家发现来自银河系内外的星际分子共 100 多种,构成地球生物的基本元素在宇宙空间的各个方向都有。我国紫金山天文台青海天文站 13.7 米口径的毫米波射电望远镜就是主要用来观测来自星际空间的分子谱线,如水分子和一氧化碳分子等。

天文发现的星际分子大多数由氢、氧、碳、氮、硫、硅 6 种元素组成。而前 4 种元素是组成生命单元细胞的蛋白质和 DNA 的最基本的元素。DNA 是细胞核中的一种复杂分子,储存了生命个体过程的信息。天文学家过去曾认为只有在地球的环境中才能产生大量的有机分子,但是在人马座一个星云中却发现了总数比地球上更多的星际酒精分子。星际空间存在大量的有机分子,说明那里可能发生着孕育生命进化的过程。

在宇宙空间,构成生命的基本物质到处可见。但是生命的存在和发展需要适宜的外界自然环境,如适宜的温度、液态水、大气、光和热等。发现这些构成生命的基本物质并不等于发现了地球之外的生命。

2. "类地行星"和文明社会的估计

地球上生命的发生、发展经历了漫长的过程。地球的年龄已有 46

亿年,直到它 30 亿年的时候才出现有细胞核的细胞,7 亿年前,才出现多细胞生物,在 3500 万年前才出现类人猿,人类的文明史才有 5000 多年,而发达的高科技时代更是近百年的事。在“类地行星”上从孕育生命到发展成文明社会需要几十亿年的时间。只有像太阳系这样由单个恒星主宰一切的系统才能提供长期稳定的条件。其它如 2 个或多个恒星组成的系统则不可能保持长期稳定,使生命得以产生和发展。中心恒星的质量要求和太阳相当,如果恒星的质量太大,恒星的演化很快,它的行星系统中生命还没有孕育成功,这颗恒星就要演变为中子星或黑洞了。

天文学家相信,银河系千亿颗恒星中约有 400 亿颗与太阳大小差不多的恒星,这些恒星中大部分都会有行星系统,其中约有 10% 的恒星的质量和温度与太阳差不多,它们的行星系统中也有可能有一颗和地球差不多的行星,那么就有 40 亿颗恒星的附近适合生命生存。很显然,年轻的“类地行星”上不会有文明社会存在,老年“类地行星”则可能因为类似“恐龙灭绝”的灾难出现而导致文明社会的毁灭。文明社会也是有寿命的,即使地球上的文明社会本身可以长期存在下去,但是在 50～100 亿年以后,当太阳演化为红巨星的时候,地球上的文明社会也将遭到毁灭,那时的人类只能迁移到其它适合智慧生物生存发展的“类地行星”上去。



图 15-9　地外智慧生命研究先驱者之一的美国天文学家弗兰克·德雷克

著名的美国科普作家阿西莫夫估计银河系中拥有文明社会的数目为 53 万个,平均 50 万个恒星中有 1 个。当然,也有人主张宇宙中没有地球之外的文明社会。他们认为,生命的发生是一种概率极其微小的偶然事件,这种偶然性在宇宙间不会反复出现。

1961 年年轻的美国天文学家弗兰克·德雷克(图 15-9)提出一个简单的公式来估计银河系中究竟有多少拥有文明社会的星球,被称为德雷克公式,其表达式为

$$N = R_s \times f_p \times n \times f_l \times f_i \times f_c \times L,$$

其中,N 为银河系中拥有文明社会的星球数,

R_s 为银河系中恒星的诞生率，f_p 为有行星系统的恒星概率，n 为恒星中适合生命居住的行星平均数目，f_l 为可居住生命并出现生命的行星的概率，f_i 为有生命的行星系统中出现智慧生命的概率，f_c 为有智慧生命的行星系统中有能力进行行星际通讯能力的概率，L 为文明社会存在的寿命。

这个公式引起天文学家的兴趣和关注，对公式的各个参数进行讨论和估计，但是很难给出其数值。不过，多数学者认为银河系中是有带有智慧生命并有能力进行行星际通讯的行星系统存在的。最乐观的估计约有 1000 万个，比较保守的估计也有 10 万个左右。

也有学者认为，在银河系中地球这样的拥有人类的行星是绝无仅有的。他们认为，地球上产生生命并演化为人类是许许多多特殊条件相结合的结果，只要其中有一个条件稍有改变，生命便不可能出现，文明社会更不可能产生。

三、飞碟之谜

既然在我们的银河系乃至河外星系中都可能有居住着智慧生物的行星，这些文明星球上的宇宙人和地球上的人类不可能处在同一个发展阶段，可能有比我们的科学技术更发达更先进的。他们主动和地球人类联系是可能的。

提起宇宙人来访，人们自然会想到奇妙的飞碟。所谓“飞碟”是人们发现的一些在空中飞行的形似碟子一样的不明飞行物(UFO)。关于飞碟的最初报道是在 1947 年，美国人阿诺德乘飞机在华盛顿州雷尼亚山上空飞行时，发现几个直径有 30 多米，碟子形状的怪物，在天上飞行。在这以后，关于发现飞碟的报道愈来愈多，生动的描述和一幅幅飞碟照片，展示在世人的面前。甚至有人宣称看到了“宇宙人”、“曾被宇宙人抓去”等等。其中一则报道中说：“一个大型飞碟，从里面走出三四个脸色苍白的生物，讲着一种喉音语言，并在他们的火炬照耀下在地上搜寻着什么。”

关心飞碟的人不少,研究飞碟的官方和民间机构纷纷成立。其中如"不明飞行物研究会","空中飞碟研究会","地球大气圈外智力活动联络委员会","空中现象研究组织","不明飞行物情报检索中心"等等。这些组织还出版刊物,召开会议甚至组织联合研究。

对飞碟是宇宙人开来的飞船的说法,有人将信将疑;有人坚决反对。1977年美国曾进行了一次有关飞碟的民意测验,大约有1500万人说,他们看到过飞碟。而1970年的民意测验是,只有750万人声称曾看到过飞碟。克劳德·波尔对一千多份关于飞碟的报告进行了仔细的分类研究后认为,这些事件中有70%是真实的。其中的20%是反映"飞碟"着陆或即将着陆时的情况;80%是反映这些飞行物在夜晚具有红橙色的彩色光环,在白天具有金属光泽,以及飞行物的形状等。美国空军曾成立过一个"飞碟调查委员会",对1947至1969年的12 618起飞碟事件作了调查分析,结论是,"飞碟不是宇宙人开来的飞船。"

我国也有很多人关注飞碟,2002年更是形成高潮。这年7月全国各地许多媒体不约而同地报道:6月30日晚10点半左右,一个神秘的发光体变幻着各种姿态掠过江苏、河南、陕西、四川、重庆等地的天空。看到这一现象的人非常多,纷纷打电话给媒体。综合各地目击者的报告,他们所描述的发光体外形、大小、持续时间、飞行方式非常相似:它很高,比一般的飞机飞得高得多;它很大,"有三个满月那么大";它很亮,颜色从橙色转成白色;它出现在西北方向,从东向西移动,速度并不快,它呈扇形;它持续的时间从两三分钟到十几分钟。由此可以推定,6月30日晚10点半左右,一个"不明飞行物"光临了从东到西的大半个中国,人们所看到的是同一个"不明飞行物"。这是近年来中国范围最大的和记录最完全的一次"不明飞行物"目击事件。它究竟是什么东西呢?据紫金山天文台研究员王思潮分析,可能是"不明的空间飞行器"。从目击的范围来看,整个中国中部都能看到,而且几乎是在同一时间,可见这个东西的位置相当高,应该在500千米以外。而大气现象的高度不可能超过只有几十千米的大气层。从它的高度来看,飞行速度远比飞机的速度高。从它的外形看,很像一只向外喷射物质的空间飞行器。虽然地球上这一地

区处于黑夜，但在外太空太阳光仍能照到这个物体上，所以它的颜色呈现出阳光的颜色。在外太空由于没有空气阻力，其喷出物质距离可达几十千米，地面应该能看得到。图15-10是目击者薄志炜2001年2月18日在云南拍摄到的不明飞行物录像中的2个画面。

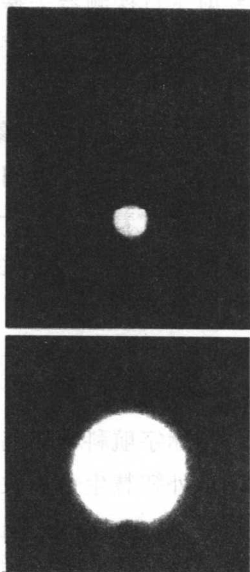


图 15-10　我国薄志炜在云南拍摄到 UFO 照片

据有关资料表明，每年全世界有数万件UFO的报告。图15-11是1974年11月17日丹麦人劳尔森在维堡市郊拍摄到的不明飞行物照片。有些科学家致力于解释观测到的不明飞行物的现象。研究表明，许多不明飞行物为气象气球、陨星、行星以及飞机着陆时的指示灯，及某些气象现象。有些飞碟现象是由电离了的空气所形成的明亮的等离子体组成，它们是电晕放电造成的。有些关于飞碟的报道则是有意编造出来的骗局。当然，也还有一些飞碟现象至今还没有一个理想的解释。



图 15-11　丹麦劳尔森在维堡市郊拍摄的 UFO 照片

人们对飞碟之所以这样兴趣盎然，是因为他们坚信，在那茫茫宇宙中的无数星球上，一定会有类似人的或比人更高级的生物。既然地球人

能发射飞行探测器去探索其它星球，甚至着陆在其它星球作实地考察，为什么别的星球上的宇宙人就不能向我们地球发射飞行探测器呢？这当然是合情合理的。

但是，研究飞碟现象必需依赖真实的证据，而不能仅根据报告人所提供的材料。人们要问，飞碟是外星人乘坐的飞船，他们为什么总是在偏僻的地方着陆？为什么总是来去匆匆，总是回避和人类见面、交谈？很显然，有关外星人已经造访过地球的报道是不真实的。

四、搜寻地外智慧生命(SETI)

国际宇航科学院成立了“搜寻地外智慧生命”的专门的委员会，把与搜寻地外智慧生命有关的各种活动纳入了科学的轨道。委员会的英文全名是 search for extraterrestrial intelligence，简称 SETI。1959 年美国康奈尔大学的天文学家柯可尼和莫里森在英国《自然》杂志发表了一篇先驱性的论文，文中提出了利用现有的设备，在 1420 兆赫频率附近搜寻地外文明的建议，得到了强烈的反映。成为 SETI 科学的第一块里程碑。

1. 宇宙通讯

在射电天文的最初阶段，人们对来自宇宙空间的无线电波不甚理解，当时就有人提出，“这是不是宇宙人拍来的电报？”经过反复考察确认不是外星人发来的信号。但是，人们依然期待能接收到外星人发来的电报。

射电天文的发展已经使射电望远镜的灵敏度和分辨率大大提高。目前世界上已有一批大型单天线射电望远镜和大型的天线阵系统。单天线系统有美国波多黎各岛上阿雷西博的 305 米口径射电望远镜，英国焦德班克的 76 米口径射电望远镜，德国马克斯· 普朗克的 100 米口径射电望远镜，澳大利亚国立射电天文台的 64 米口径射电望远镜，等等。这些射电望远镜的灵敏度都非常高，可以检测十分微弱的射电信号。

进行宇宙通讯必须选择理想的频率窗口。很显然，所选用的频率要能穿过地球的电离层，也能穿过地外文明所居住的星球的大气层。还有

一个重要的因素必须考虑,就是要尽量避开无处不在的宇宙背景的无线电辐射的干扰,选择宇宙背景辐射较小的频段。在 1400 兆赫频率附近,宇宙的背景噪声很小,只有 50 K,而在 300 兆赫附近,宇宙的背景噪声则高达 300 K(见图 15-12)。因此,在 1400 兆赫这个频率附近的 21 厘米和 18 厘米波长被认为是进行宇宙星际通讯理想的频率窗口。因为 21 厘米是中性氢谱线(H),而 18 厘米是氢氧基谱线(OH),氢和氢氧基都是组成水分子的成分,所以这个频率范围称为"水洞"。

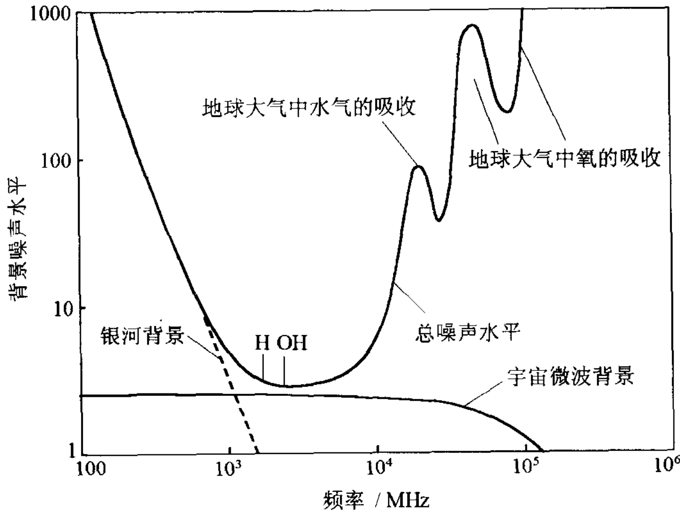


图 15-12 宇宙通讯的电磁波窗口

进行星际通讯,无论是接收外星人发来的信号还是向他们发送电报,都要选择好可能的对象。我们知道,定向发射可以使发射功率大大提高,使用方向性很强的天线,把无线电能量集中在一个很小的束中发射出,可使发射功率提高一百万倍以上。

1960 年开始了人类历史上第一次有计划地搜寻地外文明的奥兹玛计划。奥兹玛是一部童话故事中的公主,她住在十分遥远的名叫奥兹的地方,这次计划取名"奥兹玛",就是要寻找遥远地方的文明世界。该计划使用美国国立射电天文台(NRAO)的 25 米的射电望远镜,在 21 厘米波段,对两颗最可能存在智慧生物的波江座 ϵ 星和鲸鱼座 γ 星作了监测,

累计达 200 小时，没有检测到外星人发来的信号。

第二期奥兹玛计划改用两台口径较大的射电望远镜，仍在 21 厘米波段上，对 660 颗离我们较近的类太阳恒星进行监测，也没有得到结果。

奥兹玛计划是人类有史以来第一次严肃地去尝试搜寻地外文明发来的无线电波信号。虽然一无所获，但却为以后的进一步计划提出了不少重要的改进意见。人们想到，两个奥兹玛计划所使用的射电望远镜的威力还不够强大。美国的"高分辨率微波巡视"计划，使用世界上最大的射电望远镜，即美国阿雷西博射电天文台的直径为 305 米的射电望远镜。它能接收到距离我们几百光年到 3 万光年的无线电信号。用它对 100 光年以内的 800～1000 颗类太阳恒星进行监测，结果还是一无所获。

1971 年美国国家航天局的一个小组提出了"赛克洛普斯"计划。如图 15-13，这个计划中的阵包括了 1026 面百米量级直径的天线，分布在几十千米的范围内，在 18 厘米至 21 厘米波长范围内，使用约 1 赫兹的单色圆偏振束射信号进行观测。这是一个雄心勃勃的计划，也是射电天文历史上最伟大的计划。然而需要的经费太多，高达 60 亿美元。终因美国政府未能给予资助而不得不搁置起来。除了美国以外，类似的计划还在前苏联、加拿大、澳大利亚、日本等国进行过，政府支持的，民间支持

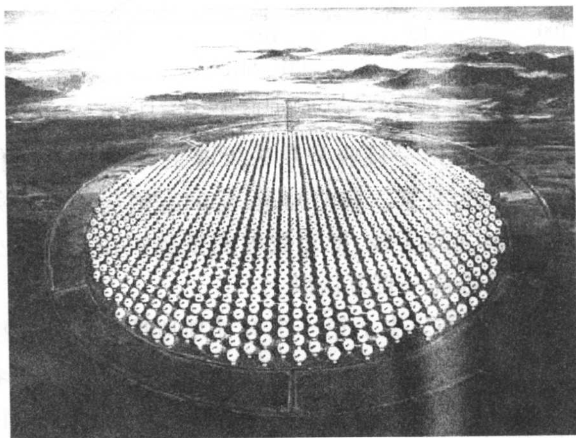


图 15-13 "赛克洛普斯星际通讯相位阵"示意图

的都有，至今没有中断。

2. 拜访地外文明社会

虽然不能说到其它恒星的行星上去拜访智慧生物的星际航行是绝对不可能的事，但是太阳系外的恒星离我们的遥远、个体生命的有限和飞船的速度和燃料等原因，使我们目前只能局限在太阳系内。

然而，不载人的飞船是可以离开太阳系到广阔无垠的宇宙空间去的。或许它能被宇宙人所截获，那么他们就可以知道我们人类的存在了。20 世纪 70 年代美国发射的“先驱者”10 号、11 号和“旅行者”1 号、2 号探测器，就富有想像力地作了这样的安排。

在“先驱者”10 号、11 号探测器“身上”，各带着一封内容相同的，向宇宙人致意的信件(见图 15-14)。信写在特殊处理过的铝板上，几亿年也

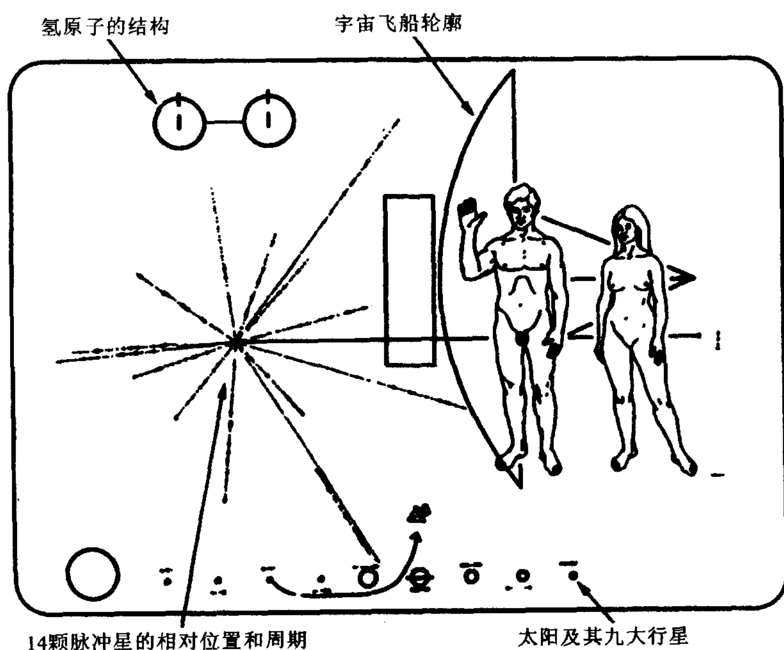


图 15-14 “先驱者”号携带的向宇宙人致意的信件

不会变形和变质。它是由美国康奈尔大学的教授、行星研究实验室主任卡尔·萨根，国家天文学与电离层研究中心主任德·瑞克和艺术家琳达·萨根等人共同设计的。他们认为，既然外星人是高等智能生物，他们必然对银河系中发出射电脉冲辐射的天体——脉冲星是熟悉的。在这封用图形表示的信中，右边为地球上一对男女的裸体图形；左边给出14个脉冲星的相对位置和用二进制表示的14个脉冲星的脉冲周期；右上边给出氢原子的结构；下边给出太阳及其九大行星（从左到右为太阳、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星），并给出飞船从地球上出发、飞出太阳系的路径。

在“旅行者”1号和2号的“身上”，带着可以播放两个小时的关于“地球之音”的唱片。这种唱片是用喷金的铜制成的，经久不坏。唱针是用钻石做成的。唱片装在一个特制的铝盒中。铝盒用钛质的螺钉固定在探测器上，见图15-15。唱片是由天文学家卡尔·萨根，艺术家琳达·萨根，音乐和科学作家费里斯，喜爱音乐的作家安·德鲁扬等组成的专家小组经过精心选材后录制的。唱片录着地球上有典型意义的信息，包括116

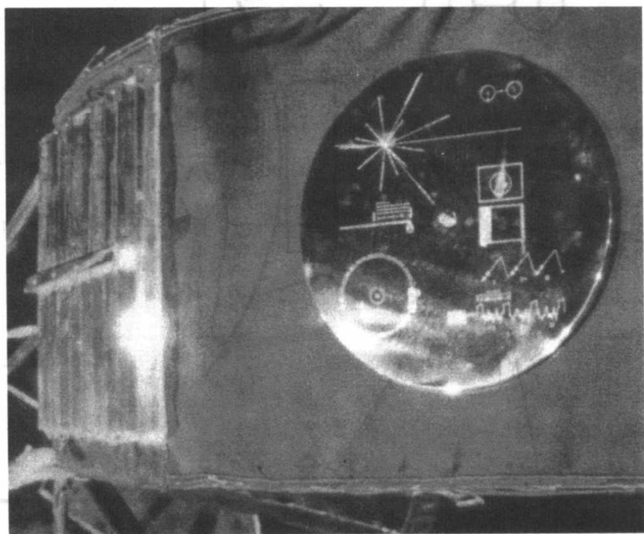


图15-15 “旅行者”号携带的“地球之音”唱片装在圆形盒子里

张图片、35 种地球自然音响、27 种世界名曲。如太阳系概况，太阳系在银河系中的位置和地球的化学成分；地球上的江河湖海、沙漠、山脉、花鸟鱼虫和飞禽走兽；脱氧核苷酸，染色体和人体图像。还有各国风土人情、科学和文明的成就，例如火箭、飞机、火车、纽约的联合国大厦、旧金山的金门桥、印度的泰姬陵和中国的长城。还录有近 60 种语言的问候词，包括我国广东话、厦门话和客家话等；成人的笑声、婴儿的哭声和动物的叫声；惊涛骇浪、狂风暴雨和火山爆发的轰鸣声；有火车、飞机、火箭发动的巨响；还有一颗脉冲星产生的周期性宇宙噪声等。

在录音带中还有美国总统签名的电报和一段联合国秘书长的讲话录音。时任美国总统的卡特签署的电文写道："这是一个来自遥远的小小星球的礼物。它是我们的声音、科学、形象、音乐、思想和感情的缩影。我们正在努力使我们的时代幸存下来，使你们能了解我们的生活情况。我们期望有朝一日解决我们面临的问题，以便加入银河系的文明大家庭。这个'地球之音'是为了在这个辽阔而令人敬畏的宇宙中寄予我们的希望，我们的决心和我们对遥远世界的良好祝愿。"

时任联合国秘书长的瓦尔德海姆代表全世界人民向外星人致意，他在录音中说："作为联合国秘书长，一个包括地球上几乎全部人类的 147 个国家组织的代表，我代表我们星球的人民向您们表示敬意。我们走出我们的太阳系进入宇宙，只是为了寻求和平和友谊。我们知道，我们的星球和它的全体居民，只不过是浩瀚宇宙中一小部分。正是带着这种善良的愿望，我们采取了这一步骤。"

"先驱者"和"旅行者"所携带的地球文明信息是丰富多彩的。它是经过多位科学家精心策划的。"先驱者"和"旅行者"此行寄托着人类殷切而美好的盼望。

科学家们也曾应用无线电技术向宇宙空间发送介绍地球上人类文明的电波信号。1974 年，用阿雷西博射电天文台的直径为 305 米的射电望远镜向武仙座 M13 球状星团发射信息。电报是用二进制的系列脉冲写的(见图 15-16)。宇宙语言只能是数学语言，不管处在何种阶段的高等智能生物都会有数的概念。这份电报是要向武仙座的智能生物传达

信息,如关于太阳系的情况;氢、碳、氮、氧、磷五种重要元素;人类生命、人体形状和高度、地球上的人口等。这份电报以每秒10个字的速度发出,它以光速传播,到达目的地要2.4万年,如果真有智慧生物收到后立即给我们回电,地球人要在4.8万年以后才能收到,因为M13距离我们是2.4万光年。

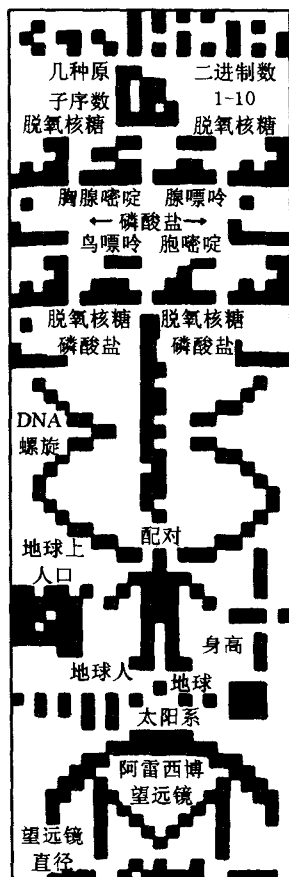


图15-16 1974年用阿雷西博射电望远镜,向武仙座M13发出的人类给太空智慧生物的无线电报电码排列图

五、寻找太阳系外的行星系统

宇宙中,有多少类似于我们太阳系的恒星—行星系统?有多少具有像地球一样条件的行星?这成为寻找地外文明的关键所在。

1. 太阳系附近的搜索

行星很小,发光极其微弱,又处在光芒四射的恒星附近,太阳系外的行星又离我们十分遥远,要想直接观测到它们是非常困难的。通常是通过间接的方法推断太阳系外行星的存在。行星受中心恒星控制绕它运行,同时行星对中心恒星也会产生一些影响,使恒星绕它们的质量中心作轨道运动,只是轨道半径非常小。这将导致恒星有时是离我们而去,有时则是向我们而来,由于这个原因,这颗恒星的光谱有时稍微有点红移(波长变长),有时稍微有点紫移(波长变短)。光学天文望远镜的光谱分析方法可以测量出光谱的变化,反过来推算出行星的质量、轨道参数。

显然在太阳系附近寻找类太阳恒星及其行星系统比较容易，意义也更大。天文学家细心地观测和调查了太阳系周围17光年以内的49颗恒星的情况，其中单星35颗。巴纳德星离太阳仅5.9光年，当然成为首选的对象。它有可能带着行星，但由于行星暗弱，特别是巴纳德星的光芒，使我们发现不了它的行星。从行星的存在必然对中心天体产生影响着手，天文学家分析了1911年以来的近70年的照相资料，检测出这种影响，因而于20世纪80年代宣布发现了它的行星系统。由于精度不够，又得不到重复验证，后又被否认。尽管如此，天文学家寻找太阳系外行星系统的努力一直继续着。出乎意料的是，天文学家不是在公认的某些离地球较近的类太阳恒星附近，而是首先在毫秒脉冲星中找到了行星系统。

2. 脉冲星观测捷足先登

毫秒脉冲星是一种特殊的天体，它几乎全部由中子组成，具有和太阳差不多的质量，但只有10千米的半径。它的自转速度惊人地快，每秒钟可以转几十到几百次，非常稳定。如果有质量很小的行星绕它运动，就会对脉冲星的自转周期产生影响。影响虽是微不足道的，但是天文学家用射电望远镜进行观测可以把行星的影响检测出来。1992年天文学家发现毫秒脉冲星PSR1257+12是有两个行星的系统。一颗行星离脉冲星大约5400万千米，公转周期为66.6天，另一颗行星离开脉冲星大约7000万千米，公转周期为98.2天。它们的质量分别为3.4和2.8个地球质量。这一重大发现是太阳系之外存在行星系统的直接的观测证据。行星系统是毫秒脉冲星强烈的高能粒子风和辐射把它的伴星的外层物质剥蚀掉而形成的，这种行星上当然不会有生命存在。但是，毫秒脉冲星的行星系统的发现揭开了人类发现太阳系外行星系统新的一页，预示着新的太阳系外行星系统将会不断地被揭示出来。

3. 光学望远镜搜索发现100例

天文学家相继用“海耳”5米光学望远镜、“里克”光学望远镜，甚至当

今最先进的哈勃空间望远镜来寻找太阳系外的行星系统。果然，不久就发现飞马座51星的行星系统。飞马座51星是一颗和太阳类似的恒星，所发现的行星的质量是木星质量的一半，行星的轨道周期约为4天，运行轨道靠恒星比较近，比我们太阳系中的水星离太阳还近。表面温度高达上千度，很难有生命存在。

随后，在室女座70周围发现质量比木星大6倍的行星。在大熊座47发现有行星围绕它运行，其质量是木星的2倍。这两颗行星温度适当，可能存在液态水，为生命的存在提供了必要的条件。但是在它们的大气中含有氨气和沼气等有毒的气体，这对生命造成威胁。要是有生命的话，它们必然具有很强"抗毒"或"解毒"能力。

最新发现的离太阳约68光年的一颗恒星的行星，名称为HD210227。它绕恒星运行的轨道周期是437天，与地球的情况比较接近，成为类地行星的典型，为研究太阳系外行星系统的形成和寻找地外文明提供了样品。天文学家还在继续观测以期发现该恒星系统的其它行星，甚至找到与地球相仿的行星。由于这颗恒星和太阳类似，在它的行星系统中发生生命现象不是不可能的。

从1995年10月6日，天文学家利用光学望远镜发现了第一颗太阳系外行星以来，到2002年9月发现太阳系外的一颗与木星相当的巨型气体行星，太阳系外行星的发现总数达到了100颗。这些发现并非是通过直接观测得到的，其方法与射电望远镜发现毫秒脉冲星行星系统的方法类似，是通过对这颗行星对所绕行的恒星所造成的微小影响的观测后间接证实的。

长期以来，天文学家期望能拍摄到太阳系外行星的图像，以就像我们熟悉的太阳系九大行星那样的图像一样给出直接的证据，因此特别注意考察某些亮星近旁的暗弱的小亮点，以进一步考察是否是该亮星的行星。最近几年确实发现了一些亮星近旁的暗淡的小亮点，但是，满怀希望的跟踪观测，以图确认是太阳系外的行星的努力并未成功，监测结果表明这些小亮点是伴星或是毫无关系的背景星，而不是行星。2004年4月，欧洲与美国天文学家应用欧南台的位于智利的8.2米VLT Ⅳ望远

镜和自适应光学系统，在近红外波段观测长蛇座 TW 中的褐矮星 2M1207，发现在它的近旁有一个比它暗 100 倍的小红点，取名为 2M1207 b。当年 6 月，获得其红外光谱，发现有水分子存在，再次确认是一个很暗的小天体。2M1207 质量约为木星的 25 倍、太阳的 1/40，距离地球约为 230 光年。2M1207 b 离 2M1207 中心的角径为 778 毫角秒，相当于 55 天文单位，2M1207 b 的表面温度约为 1000℃，质量约为木星质量的 5 倍。图 15-17 是 2M1207 及 2M1207 b 的照片。

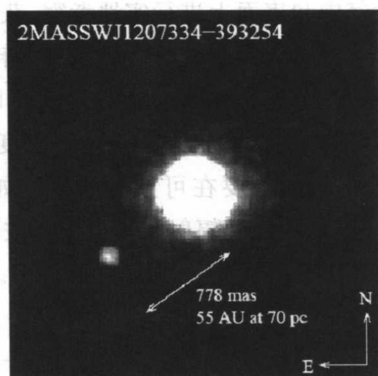


图 15-17　褐矮星 2M1207（中心）和其附近的暗天体 2M1207 b，后者被认为是 2M1207 的一颗巨行星

目前，天文学家还不能完全确认这个小暗星就是 2M1207 的行星，但也没有充分的理由推翻它是行星的看法，所以把它列为巨行星的候选体。究竟是不是行星，在未来 2～3 年中监测 2M1207 b 相对于 2M1207 的运动状况就能判断其真实身份。

发现太阳系外行星系统的存在已取得重要进展。但所探测到的与地球类似的行星系统却很少，即使判断为类地行星，也是缺乏能进一步确认它们各种情况的众多的具体数据。寻找另一个"地球"仍然是天文学家所追求的目标。

4．进一步的追求

目前，搜索太阳系外的行星系统的能力不强，观测研究有很大的局限性。间接的方法所发现的行星系统只能确认行星系统的存在，以及它们的质量和轨道运动参数，不可能得知其环境是否适合生物的生存和繁衍。我们已经成功地利用地球上的望远镜观测太阳系中的行星，发射宇宙飞船到某些行星附近进行近距离考察，甚至把探测器直接送到行星的

大气中和表面上进行实地考察，获得到丰富的信息。

搜寻太阳系外的行星系统将转向直接的观测。困难当然是很大的，首先在可见光波段行星的光度要比它的恒星暗100亿倍，离我们又远，不可能观测到。但是，行星的温度低，辐射主要在红外波段。恒星的温度高，辐射主要在可见光波段。如果在红外波段观测这个行星及其恒星，行星的红外辐射比其可见光波段的辐射要强40倍，恒星的红外辐射则要比其可见光波段辐射低得多。因此在红外辐射波段监测是发现行星的一种较好的方法。

美国航空航天局正在研制新一代的空间望远镜干涉系统来搜索新行星。在这个计划中，将发射4～6面大小为30～60厘米的镜子组成干涉仪；还计划在2010年发射一颗名叫“发现者”号的干涉仪系统，由5面1～2米的镜子组成的90米宽的干涉仪，其运行轨道在木星之外。

天文望远镜的空间分辨率由波长和望远镜的口径尺度的比值决定，波长越短分辨率越高，口径越大分辨率越高。干涉仪的分辨率不是由单个镜面的口径决定，其分辨率由组成干涉仪的多个镜面之间的最大距离决定。预计在2010年发射的干涉仪的分辨率相当于一个口径90米的光学望远镜的空间分辨率，比现在的哈勃空间望远镜的分辨率高出40多倍，能够把太阳系以外像海王星那样小的行星分辨出来，也可以测出行星的大气层的化学成分。这是目前任何其它发现太阳系外行星系统的方法所做不到的。

思考和复习题：

1. 为什么太阳系中只有地球上生机勃勃？
2. 你相信银河系中除了地球还有其它文明社会吗？
3. 人类已经有哪些搜索“地外文明”的活动？有无意义？
4. 如何看待UFO现象？
5. 试叙述搜寻太阳系外行星系统的方法。

附录 1　名词解释

在本书各讲中所讲述的内容由于要联系到现代天文学和物理学的很多深奥的理论和技术,必然涉及很多天文学和物理学的名词。虽然我们力求把涉及的名词作深入浅出的讲解,但是仍有部分名词未能作比较详细的解释。为了帮助同学学习,我们把部分名词收录在这里作进一步解释,并尽量做到简洁和易于接受。对那些已讲解清楚的名词就不收录了。以中文名拼音为序。

A

爱丁顿,A.S.

英国天文学家和物理学家。1882 年出生,1913～1944 年任剑桥大学天文学教授。曾任英国皇家天文学会会长、物理学会会长、数学协会会长。1938～1944 年任国际天文学联合会主席。他在恒星物理,特别是恒星内部结构方面有重要的贡献。首先利用日食观测验证了爱因斯坦广义相对论关于光线在引力场中偏转的预言。

暗条

暗条是日珥在太阳表面上的投影,像一条条姿态各异的长蛇。有些暗条是极性相反的局部磁场的分界线,其弯曲情况代表了磁场结构的复杂程度。通常,暗条处于宁静状态,但有时会突然活跃起来,运动速度增加,形状变化,但在几分钟内又恢复宁静状态。

B

北极星

在北半球观察星空的周日旋转时,会发现北边天空中有一颗星基本不动,这就是北极星。北极星是小熊座 α 星,亮度 2 等,距北天极 45′。由于周围没有其它亮星,所以把它称作北极星。地球的自转轴正好朝向北极星,所以北方天空中的星星都以北极星为中心,围绕着北极星做周日旋转运动。

波的干涉

波具有叠加性。由于叠加,两列具有相同频率、固定相位差的同类波在空间共存时,会形成振幅相互加强或相互减弱的现象,称为干涉。特别是当波峰遇到波峰和波峰遇到波谷时,增强和减弱的情况最为明显。

布朗运动

1827 年苏格兰植物学家 R.布朗发现水中的花粉及其它悬浮的微小颗粒不停地作无规的折线运动,称为布朗运动。但是人们一直不知道起因。50 年后,J.德耳索提出是由于微小颗粒受到周围分子的不平衡碰撞导致的运动。后来得到爱因斯坦等研究的证实。布朗运动也就成为确定原子概念的一个重要实例,成为分子运动论和统计力学发展的基础。

变频器

变频器由混频器、本地振荡器和选频回路组成。要想把输入频率 $f_{入}$ 变为 $f_{出}$,则要选择适当的本机振荡频率 $f_{本}$,使输出信号的频率等于输入信号的频率与本机振荡频率之和或之差。

丙烷

为无色无臭的易燃气体，碳氢化合物，分子式为 $CH_3CH_2CH_3$。工业上可从油田气和裂化气分离得到。丙烷、丁烷和少量乙烷的混合物液化后可作民用燃料，即液化石油气。

泡利不相容原理

在微观世界中，有一类粒子称为费米子，如电子、中子、质子及某些原子核，它们具有半整数的自旋。费米子遵从泡利不相容原理，以电子为例，电子的能量状态不仅只能取不连续的量子态，而且同一个状态只能允许一个电子占有。从低向高排列，低能态的占满了，就只能到高能态去。所以，当电子密度很高时，必然有很多电子处在高能态，具有非常高的速度，产生非常高的简并电子气压。泡利因提出这个“不相容原理”荣获 1945 年的诺贝尔物理学奖。

玻色子

在微观世界中，有一类粒子称为玻色子，如光子、α 粒子、氢原子等，它们具有整数自旋(0, 1, ……)。它们的能量状态只能取不连续的量子态，但允许多个玻色子占有同一个状态。

贝特，H.A.

美籍德国物理学家。1906 年出生，1935 年赴美国康奈尔大学任教，1944 年加入美国国籍。1938 年他提出太阳能源可能来自内部的氢核聚变为氦核的反应，由于直接的聚变反应不可能，他提出“碳循环”的间接方式形成氦核，并放出能量。这一研究成果成为他荣获 1967 年诺贝尔物理学奖的主要原因。

波前

天文望远镜是用来接收来自天体的电磁波。天体发出的电磁波以

光速传播，在某一时刻发出电磁波，其前沿曲面叫做波阵面，也叫波前。

C

测不准关系

德国物理学家 W.K. 海森伯首先提出来的微观世界的一个基本法则。对于微观世界的粒子，不可能同时测得它的位置和动量的准确值。位置和动量的测量误差满足 $xp_x \geqslant \frac{h}{2\pi}$ 关系，h 是普朗克常数(6.6261×10^{-34}焦耳·秒)，粒子所占的体积越小，那么它的动量就越大。因此，密度非常高时，电子、质子和中子气体必然出现许多动量异常高的粒子。

嫦娥奔月

一直在我国民间广为流传的神话故事。故事中说，年轻美丽的嫦娥原是大力士、神箭手后羿的妻子。有一次她误吃了王母娘娘送给后羿的两粒仙丹，身体变得轻飘飘的，一下子就升上了太空。她看见月亮上面的宫殿金碧辉煌，光彩照人，就做了广寒宫的主人。故事表达了古人梦想飞到月亮上去看一看的美好愿望。

磁偶极辐射

一个旋转磁偶极子会发出电磁辐射，称为磁偶极辐射。其辐射频率就是磁偶极子的旋转频率。磁偶极辐射的强度与垂直磁矩的平方成正比，与周期的 4 次方成反比。脉冲星是高速自转的磁中子星，具有宇宙中最强的磁场，也即最强的磁矩，周期又非常之短，因此它们的磁偶极辐射极强。

查龙(又译为卡戎)

冥王星的卫星(又称冥卫一)，以希腊神话中的冥河的艄工查龙的名字命名。冥卫一的半径为 580 千米，比冥王星 1150 千米的半径小一半，

差别不太大，所以有人认为这是一对“双行星”。有意思的是，冥卫一的自转周期和它绕冥王星公转的周期与冥王星的自转周期完全一样，都是6天9小时16分50.9秒。

超重现象

当火箭发射时，卫星舱具有很大的加速度，在舱中的宇航员或物体除了经受地球引力（重力）以外，还要经受很大的向下的惯性力，出现超重现象。

D

等离子体

由带正电的离子和带负电的电子及部分中性原子组成的物质。若没有中性原子则是完全电离等离子体。等离子体是电中性的，但每个粒子都同时与周围的物质发生库仑力的作用。其性质与物质的固、液、气态不同，故称为物质的第四态。宇宙中的大部分物质都处在等离子体状态，太阳、恒星、地球的电离层和太阳喷发的高能粒子流以及大部分星际介质都是等离子体。

太阳对流层

我们眼睛看见的是太阳光球，在光球以下有一层气体处在对流状态，约厚15万千米。对流引起气体的上升或下降，可以把在太阳中心由热核反应产生的能量的一部分带出去，成为产生黑子、耀斑、日珥等现象的动力。

氘（^2_1H）和氦-3（^3_2He）

氘是氢原子核的同位素，氦-3是氦的同位素。凡原子核中质子数相同而中子数不同的原子核称为同位素。氢原子核中只有一个质子，而氘原子核中多了一个中子。氦原子核中有2个质子和2个中子，而氦-3的

原子核中少了一个中子。氦-3 是一种十分理想的、无毒、无放射性的核能源，据推算月球上有 100 万～500 万吨这种最优质的核燃料，足够地球上的人类使用几千年甚至一万多年。但地球上却几乎没有。

大气压

地球大气的分子运动对地球表面产生的压力。单位面积上所受的力为压强，气象上用测量地之上的单位截面的垂直大气柱的重量来表示。常用单位有毫巴(mbar)，毫米水银柱高度(mmHg)、帕、百帕等。一个标准大气压相当于重力加速度为 9.8 米/秒^2，温度为 0℃ 和 760 毫米水银柱的压强，等于 1013.25 百帕。

电子静止能量

根据狭义相对论，物体的质量 m 和能量 E 之间可以相互转换，存在 $E=mc^2$(式中 c 为光速)的关系。因此静止的物体也有能量，静止电子的质量为 0.91094×10^{-27}克，因此它的静止能量为 0.511004×10^6 电子伏。能量比静止电子的能量大 2 倍以上的高能光子，就有可能转化为正负电子对(一个电子和一个负电子)。

多普勒效应

观测者与产生波(声波、无线电波、光波等)的物体之间有相对运动时，观测者测量到的波的频率要发生变化。彼此远离，频率变低，称为红移；彼此靠近，频率变高，称为蓝移。

地球大气臭氧层

离地面约 10～50 千米处的大气层，由于受太阳紫外线的作用产生臭氧而形成臭氧层。在 20～30 千米范围的臭氧的含量最高，但也仅占同高度的大气体积的十万分之一。臭氧层能吸收太阳的紫外线，使人类免遭紫外线的伤害。

大气湍流

大气湍流是指空气质点的一种无规则运动状态，是大气中的一种重要运动形式。大气湍流使空气发生强烈的垂直和水平扩散，还能对光波、射电波和声波的传播产生影响。

F

非热的辐射机制

热辐射是我们熟知的辐射。我们熟悉的煤炭的燃烧、电灯泡的发光和太阳光都是热辐射。热辐射的状态由物体的温度决定。非热辐射机制源于一个基本的物理学原理：任何带电粒子做加速或减速运动时都会发出辐射。由于电子的质量非常小，非常容易获得很高的加速度，因此辐射很强，远远超过质子或离子的辐射。所以通常所说的非热辐射是指高能电子的加速产生的辐射。按电子运动的状况，可分为曲率辐射、回旋辐射、同步辐射、康普顿辐射等。

辐射压力

电磁辐射的能量和动量都沿矢径方向流动，若在其传播方向上放置一平板，将会使电磁波的动量发生变化，动量变化就产生了力，这就是辐射压力。恒星内部的核聚变产生很强的辐射，也就产生了向外的抵抗引力的辐射压，这是恒星能稳定存在的首要条件。

放射性物质和半衰期

原子核自动地发射出各种射线的物质，如铀、钚和镭等，它们会自动放射出 α,β,γ 射线，这三种射线分别是氦原子核、电子和高能光子。放射性原子的衰变遵从指数规律，处在特定能态的放射性原子数目减少到原来一半的时间称为半衰期。

G

郭守敬

元代天文学家、数学家、水利专家(1231—1316)。他对天文学的贡献主要在观测仪器的研制和天体测量方面。他设计或监制了12种天文观测仪器,如简仪、高表、候极仪、浑天仪、仰仪、日月食仪、星晷定时仪等。在他主持下进行了大规模的天体测量,获得一大批恒星的位置参数;获得精确的回归年的天数:365.2425日,这与目前国际上采用的值完全一样;测定了黄道与赤道的交角:23°33′23″,这与现代天文学家测得的数值很接近,仅差1.4′。

光电倍增管

根据光电效应制成的光电器件。当频率超过一定值的光照射在金属表面上时能使金属发射电子,光子变成为电子,这就是光电效应。光电倍增管由光电阴极、电子光学系统、电子倍增系统和阳极组成。光电阴极接收入射光子的作用后发射光电子,光电子在电场的作用下加速并轰击倍增极,从而产生非常多的次级电子。光电子经多级倍增后可以产生更多的电子到达阳极形成电流。

光纤

光学纤维是传输光信号用的,光纤技术是在20世纪50年代才发展起来的新技术。单根光学纤维本身就是一个光导管,光仅仅在这根透明纤维中传输,它与传输电信号的金属波导类似。光线在光纤传输的原理是利用光纤的芯—涂层界面上发生的内全反射,光线只能沿着光纤向前传输。光纤的直径很小,在几微米到几百微米的范围。

干冰

干冰是固态二氧化碳,为白色分子晶体。干冰主要用作制冷剂,常

用于低温实验、人工降雨，以及食品速冻保鲜等方面。

光斑

太阳光球边缘出现的明亮组织，与谱斑关系密切。只是光斑在光球，谱斑在色球。光斑常环绕黑子，与黑子密切相关。也有 11 年的活动周期。

光栅

这是利用多缝衍射原理使光反射色散的光学元件。主要有透射光栅和发射光栅，是光学仪器中的高级色散部件，色散能力特别强，能把不同波长的光线分得非常开。目前最常用的是平面反射光栅，通常是在玻璃坯平面上镀一层铝膜，然后刻划上许多平行的等间距槽线。槽线非常密，每毫米可达 1～1200 根线。波长越短，要求线越密。

H

红外辐射

比可见光波段最长的红光的波长还长，介于红光与无线电波微波之间的电磁波，其波长范围约在 7×10^{-7}～1 毫米之间。太阳光和物体的热辐射都包括红外辐射。

黑体辐射

一般的物体对入射的电磁波部分吸收部分反射，但黑体是能够全部吸收所有入射的电磁波的理想物体。黑体受热后将以电磁波的形式向外辐射能量，黑体辐射场能量密度按频率的分布由普朗克公式决定，仅是温度的函数。

黄道和白道

地球一年围绕太阳运行一周，从地球上看就是太阳在天空中转了一

个大圆圈,这个大圆圈就叫“黄道”。月球每个月绕地球运行一周,它也在天空中画出一个大圆圈,这个大圆圈就叫“白道”。

彗星

彗星和九大行星一样,也是太阳系的成员,很多彗星来无影,去无踪,真好像是天上的不速之客。平常我们见到的彗星都是拖着长长的尾巴,看起来像一把倒挂的扫帚,因此,我国民间把彗星称为“扫帚星”。彗星本身不发光,当它们运动到太阳附近时,在太阳光的照射下,亮度加强。中国古代对彗星的记录很多。不仅有文字方面的记载,还有图像方面的记载。1973 年出土的长沙马王堆三号汉墓中,有一幅帛画中就画了20 多种彗星的图像,对彗星和彗尾的形状和特征描绘得相当真实。太阳系里的彗星很多,据天文学家估计太阳系内的彗星多得要以亿来计数,目前已经观测到的有将近 2000 颗。

彗木碰撞

1994 年的夏天,发生了一次苏梅克—利维 9 号彗星撞击木星的事件。这颗彗星在木星强大的引力作用下碎裂成 20 多块,并改变了其原来的运行路径,在 1994 年 7 月 17 日至 22 日彗星的 21 块碎片按天文学家预言的那样一块接着一块地撞到木星表面上。最大的一块碎片直径约 3.5 千米,相撞时,产生的烈焰高达 1600 千米。碰撞之后在木星表面留下的黑斑比地球还大。撞击所产生的能量相当于 3 亿枚原子弹同时爆炸,所发出的红外辐射极其强烈。

惊心动魄的场面看过之后,人们十分关心的思考:我们的地球是否也有可能受到彗星的袭击?当然,彗星和地球相撞的机会要比彗星撞击木星的机会小得多。然而,也不是一点可能性都没有。天文学家比以往更加重视对彗星的研究了。

恒星的径向脉动周期

恒星世界中有一种称为脉动变星的,如造父变星,其辐射具有周期

性,变光周期大多数在1天到50天之间。恒星光度的变化是由于星体发生有节奏的径向膨胀和收缩而造成的。脉动周期与平均密度的平方根成反比,周期越短,平均密度越高。如果脉冲星的周期是中子星的径向脉动的话,要求脉冲星的密度范围超过6个数量级,同一类恒星的密度不可能有如此大的差别。

核力

使核子组成原子核的作用力,属于强相互作用的类型。原子核中有中子和质子,质子带正电,相互排斥,是非常强大的核力把它们吸引在一起,使它们共处在一个非常小的区域形成原子核。核力是短程力,只有在原子核尺度范围内才显现出来。

恒星自转周期

恒星自转是一种普遍的现象。但是不可能转得太快,第一个限制是恒星的赤道上的质点的线速度不能超过光速;第二是赤道上的物质所受到的离心力不能超过引力,否则赤道上的物质被离心力甩出去而使星体崩溃。正常恒星的自转周期达不到脉冲星的周期(1.5毫秒~8.5秒),只有中子星的自转周期才能达到这个范围。

核反应

入射粒子(或原子核)与原子核碰撞(称靶核)导致原子核的状态发生变化或形成新的原子核的过程。反应前后的能量、动量、角动量、质量、电荷和宇称都必须守恒。反应进行时放热的称放热反应,反应时吸热的称吸热反应。入射粒子与靶核产生的各种反应的几率用核反应截面来表示。

哈雷彗星

哈雷彗星是英国天文学家哈雷于1682年观测到的一颗彗星。他研究后认为这颗彗星是曾于1531年和1607年出现过的同一颗彗星,并进

一步确认这颗彗星每75～76年回归一次。1758年底,这颗彗星果然如期出现了。天文学家为了纪念他在研究彗星方面的贡献,把这颗彗星命名为哈雷彗星。哈雷彗星在本世纪有过两次回归,即1910年和1986年。

J

角动量

这是一个描写物体转动状态的物理量。由 $\boldsymbol{L}=\boldsymbol{r}\times m\boldsymbol{v}$ 表示,$\boldsymbol{v}$ 是速度,$\boldsymbol{r}$ 是物体绕某轴转动的矢径。角动量的方向是在与速度和矢径组成的平面垂直的方向上。

进动

一个自转的物体受外力的作用导致其自转轴围绕某一中心旋转,这现象称之为进动。陀螺被抽打后就会发生进动。太阳和月球对地球赤道隆起部分的吸引导致地球自转轴绕黄道面的垂直轴旋转,26 000年旋转一圈,这种运动称为日月进动。进动会导致天体位置的变化。

近日点和远日点

行星围绕太阳作椭圆轨道运动,轨道椭圆长轴靠近太阳的端点称近日点,另一端称远日点。

焦点和焦距

平行于凸透镜光轴的光线透过透镜后会聚于一点,这点就是透镜的焦点。这点位于光轴上,又称主焦点。主焦点到透镜中心点的距离称焦距。

镜面拼接技术

光学望远镜的口径越大,其聚光本领和分辨能力就越高。但是,单

镜面的反射镜镜面越大，制造起来的困难就越多，特别是无法解决地心引力和温度变化引起镜面变形。采用多个小镜面拼接成大口径镜面的想法早在 1932 年由意大利天文学家霍恩·达尔多提出，用一组小镜子组成一台口径为 1.8 米的反射望远镜，每个小反射镜靠其背后的螺旋装置来调整它的位置和角度。虽然他的实验没有成功，但却成为当今光学望远镜发展的潮流。目前世界上最大的一对望远镜凯克Ⅰ和凯克Ⅱ的主镜口径均为 10 米，是由 36 块口径为 1.8 米的六角形小镜子拼接组合而成的。

甲烷

分子式为 CH_4，广泛存在自然界中，在天然气中甲烷的体积占 60%～98%。甲烷又称沼气，可由牲畜粪便和农产品废料发酵产生，可作燃料。木星、土星大气中有大量的甲烷。

激波

又称冲击波，主要是在流体中以高于声速的速度传播并对流体产生压缩作用的波。气体中的激波最为明显，受压缩的气体和没有受压缩的气体之间有一个很薄的波阵面把它们隔开，这个波阵面的前后的压力不同，有突然的变化。这个压力比越大，激波就越强。

基本粒子

物理学家把构成物质的最基本成分称为基本粒子。随着物理学的发展，这个观念发生了多次变化。20 世纪初，把原子当作物质的最基本的组成成分。后来把光子、电子、中微子、质子、中子以及大量的介子等称为基本粒子。实际上，质子、中子等强子是由夸克组成。不少物理学家认为基本粒子的提法并不正确。

简并气体

遵从量子力学的规律的微观粒子，如电子、质子和中子统称简并气体。

K

开尔文温度(绝对温度)

这是1848年英国物理学家开尔文根据热力学第二定律定义的一种温度标准,定义水的三相点温度为273.15 K后所得的温度,过去也曾称绝对温度。开尔文温度常用符号T表示,单位为K。摄氏温度符号用t表示,则有关系:$t = T - 273.15$,摄氏温度零度等于绝对温度273.15 K。

L

历法

确定年、月、日的时间长度的方法就称历法。主要有阳历、阴历和阴阳历三种。地球自转一周为一天,这是最基本的单位。阳历把地球绕太阳运动一周的时间定为一个回归年,根据观测一个回归年有365.2422天,故取一年365天,每隔4年闰年一次为366天。一年定为12个月以及一个月定为30天、31天和2月的28天(闰年时为29天)则是人为的。阴历是根据月球月相变化来决定一个月有几天,称朔望月,为29.53059天。阴历的日期一定要与月球的圆缺相联系,初一是朔(新月),十五、十六或十七为望(满月)。阴阳历则兼顾阳历和阴历两方面的特点,一年只有354或355天,大月30天,小月29天,保持了朔望的特点。为了保持阳历季节变化的特点,采取每隔2年到3年增加一个月的办法来调剂。即有时为13个月,384或385天。我国古代流行这种阴阳历。

亮温度

这是天体射电辐射强度的另一种表示方法。由于绝对黑体在某波段的辐射强度仅由温度决定,我们就把天体在某波段的辐射强度用与它相同强度的黑体辐射的温度来表示。

流星和流星雨

太阳系中有非常多的直径从10微米到几十厘米甚至几米的尘粒和固体物质,统称流星体。流星体也像九大行星一样沿椭圆轨道围绕太阳运动。有些流星体的轨道与地球的轨道比较接近,当它们经过地球附近时,由于受到地球的引力作用,改变了原来的运行轨道,闯入地球的大气层。流星体和空气发生激烈的摩擦而燃烧、发光,这就是我们看到的流星现象。有一种很壮观的流星现象,即“流星雨”。流星雨总是在每年的某些固定不变的日子里出现。这是因为彗星在围绕太阳运行的过程中,每次经过近日点附近时,都会向外抛出大量物质,有的甚至会完全碎裂,形成流星群,它们慢慢地分布在彗星的整个轨道上,形成一个个椭圆形的环。这些各不相同的流星群轨道和地球轨道分别相交于一点。这样地球每年就会在不同的日期与不同的流星群相遇。

卢瑟福原子模型

E. 卢瑟福于1911年提出的原子模型。当时发现中性的原子中有负电子存在,因此必然存在带正电荷的成分。这个模型认为,原子的全部正电荷和绝大部分质量集中在小于10^{-14}米的范围内,即原子核内。而电子则分布在核外半径约10^{-10}米的区域内。

量子力学

物理学的一个分支,是研究微观粒子,诸如原子、分子原子核和基本粒子等运动规律的理论,是现代物理学的基础之一。微观粒子所遵循的运动规律不同于宏观物体的运动规律,因此经典力学无法解释。微观粒子具有波动和粒子两重特性,有名的电子衍射实验证实了电子具有波动性。量子力学把粒子当作波来看待,用波函数来描述粒子的状态。微观粒子的坐标、动量、角动量、能量等不再像经典力学中都具有确定的值,而是具有一系列可能的值,每个可能值以一定的几率出现。

量子力学的隧道效应

量子力学理论允许微观粒子以一定的几率穿透势垒区,势垒越高,越宽,穿透的几率越小。这就是量子力学的隧道效应。按经典力学规律,这是不允许的。

M

弥漫的星际云

银河系中除了恒星之外,还有许多由气体和尘埃微粒组成的星云,总称为银河星云。弥漫星云是其中的一种,它们的形状很不规则,呈弥漫状,没有明确的边界,亮度非常低。

密度波理论

为解释星系旋涡结构而形成的一种理论。密度波理论认为,恒星绕转速度和空间密度都是变化的,运动慢则恒星密集,运动快则恒星稀疏,因此空间密度也呈波动变化,这种密度波绕星系中心环行传播,也沿径向传播,密度波极大的波峰呈旋涡分布而形成稳定的旋臂。

昴星团

位于金牛座,在梅西叶星表中排行 45,简称 M45。它们正好位于中国古代划分的三垣二十八宿的昴宿内,所以称为昴星团。实际直径约 13 光年,距离我们大约 417 光年。包含的星共有 100 多颗。肉眼能看到 6 颗星,而古代我国民间称为七姐妹星团,因为那时能看到 7 颗星,有 1 颗星现在已变暗了。亮星周围都有白色的星云包围着,好像几朵盛开着的棉桃。这是因为亮星周围的物质反射星光而形成了反射星云。而亮星周围这些物质的来源,尚不清楚。

N

能量守恒和动量守恒

自然界一切物质都具有能量,能量有多种形式,彼此可以转换,或从一个物体传递到另一个物体,但各种形式的总能量保持不变。物质之间通过相互作用而使运动发生转移,在转移过程中总的动量保持不变。在微观世界中粒子之间的碰撞也遵从能量守恒和动量守恒。

P

谱斑

太阳色球层中的活动现象。用电离钙(CaII)的 H、K 线观测太阳圆面时,可以看到大块增亮区域,这就是钙谱斑。用氢的 H_{α} 线观测得到的增亮区域称氢谱斑。谱斑的线径从几千公里到几万公里,形状和结构均在变化之中。与黑子有较好的相关性。其寿命可持续几个太阳自转周。

偏振

电磁波是一种横波,即电场及磁场的振动方向与传播方向垂直。在非偏振情况下,电矢量的振动方向是随意的,各个方向都有可能。偏振现象则是电矢量的振动方向被限制,若只能在一个方向振动,称线偏振,若电矢量的末端有规则地画出一个圆或椭圆,称为圆偏振或椭圆偏振。偏振现象首先在可见光的研究中发现,后来才知道所有波段的电磁波都有偏振现象。

Q

全反射

光从光密媒质射到光疏媒质的界面时，入射角总小于折射角，当入射角大到一定程度(即超过临界角)时，光线就不能进入分界面，全部被反射回原媒质。这种现象称全反射。光线能从光导纤维的一头传输到另一头就是利用光线在光纤中不断地全反射。

起潮力

一个天体的某个部分受到另一天体的吸引力，若这个吸引力与该天体中心同样质量的部分所受到的引力不同，这个差值就是起潮力。我们熟悉的海潮现象是由月球和太阳对地球的起潮力引起的。月球因离地球比太阳要近得多，因此月球起潮力比太阳起潮力要大得多。这个起潮力可以引起地球上水位、地壳、大气的周期性升降现象。在其它多个天体系统的研究中，起潮力成为某些天体的形状、距离、运动和演化的不可缺少的因素。

曲率辐射

在非常强的磁场条件下，电子被束缚在磁力线上，只能沿磁力线运动。如果磁力线是弯曲的，电子沿弯曲的磁力线运动可以获得向心加速度并发出辐射，这时产生的辐射称为曲率辐射。在脉冲星的磁极冠区，开放磁力线是弯曲的，磁场又比较强，因此曲率辐射在脉冲星辐射中占有重要的地位。

切连科夫光子

这是一种非热辐射。1934 年苏联物理学家切连科夫发现高速电子在各种高折射率的介质中发出淡蓝色的微弱可见光，这种光具有很强的方向性。后来夫兰克和塔姆证明这种光是由于带电粒子的速度超过了

媒质中的光速(相速度)。它不是由带电粒子发出的辐射,而是高速带电粒子与媒质内的束缚电荷和诱导电流所产生的集体效应。1958年,切连科夫、夫兰克和塔姆三人因此项研究荣获诺贝尔物理学奖。

R

日食

日食是由太阳、地球和月球这三个天体之间的相对运动而引起的。地球围绕太阳运转,月球又围绕地球运转。当月球运行到太阳和地球中间时,如果太阳、月球、地球三者正好处在一条直线上或接近于在一条直线上,那么在地球上被月球影锥扫过的地区内就会看到月球圆面正好把太阳圆面遮住了,这就是日食现象。日食共有三种:日全食、日偏食和日环食。对某一地区来说,日偏食现象还比较常见,日全食现象大约要相隔300年才能见到一次。在20世纪这100年当中,中国境内共发生了7次日全食。

日地关系

研究太阳与地球之间的关系,属于太阳物理学和地球物理学之间的边缘学科。太阳辐射和各种太阳活动现象对地球的地磁场、电离层、气候,以及人类的生活和健康、万物的生长都有着密切的关系。

S

声波

在可压缩的大气中,声源的振动使周围的大气产生压缩和膨胀,形成大气的波动,称为声波。声波属于纵波,可以沿任一方向传播。地球大气中的声速约为320米/秒。

三棱镜

是光学仪器中的色散部件,它对不同波长的光有不同的折射率,红光折射最小,蓝光折射最大,也即波长越短折射越大。1666年牛顿利用三棱镜研究了色散现象,这是人类第一次把阳光分为红橙黄绿青蓝紫七色光。

双星的轨道运动周期

两颗星由于引力作用,彼此互相环绕运动形成双星。两颗星相互环绕的周期称为轨道周期。有一类称为掩食双星的,它们相互绕转彼此掩食,使我们观测到的其中的一颗恒星亮度发生周期性的变化。把开普勒行星运动第三定律应用到双星,便能给出双星轨道运动周期(p)和它们的质量(M)及它们之间的距离(a)的关系:$a^3/p^2 = G(M_1 + M_2)/4\pi^2$。双星的两颗子星靠得越近,它们的轨道周期就越短。

沈括

北宋著名科学家(1031—1095)。其著作《梦溪笔谈》中记述了北宋时期多方面的研究成就和他自己在天文、地理、数学等的研究结果。他对月相的成因、陨石的成分、太阳视运动的不均匀性、观测台站选址等的研究都符合现代天文学的结果。在任天文官(司天鉴)期间,强调天文实测,研制和改进天文观测仪器,推行新的历法。他所研制的新浑仪简化了结构并提高了观测精度。

色差

光学系统的实际成像与理想成像的差别,统称像差。色差是其中一种,是因为透射材料的折射率随波长不同而不同造成的,故只对多色光才显现出来。其中位置色差是因为不同波长的光线聚焦在不同的焦点所致,而横向色差(又称放大色差)是因为不同波长光线的像高不同所致。利用不同玻璃材料制成的凹、凸镜组合可以消除色差。

T

透镜

透镜是光学望远镜的重要部件。由透光材料(玻璃或水晶)制成,主要有球面透镜和柱面透镜。球面透镜的两面均磨成球面,或一为球面一为平面。凸透镜的中央部分比边缘厚些,具有会聚光线的功能。凹透镜的中央部分比边缘薄些,具有分散光线的功能。

太阳高能粒子流

太阳耀斑发生时,发射大量高能粒子,主要是质子。能量可达 1~1000 兆电子伏。对于能量大于 1 兆电子伏的事件称为质子事件。

W

武王伐纣

西周是公元前 11 世纪到公元前 771 年期间中国的统一王朝,但在史书上没有准确的年代记载。在初期周武王伐纣灭商是历史上有名的事件,也不知道准确的年代。但是在武王伐纣事件期间,有很多天象记录,因此考察某些天象发生的确切时间有助于考证武王伐纣事件发生的年份。

X

新星

原来很暗的恒星突然爆发,亮度增加几万倍。过去误认为这种星是新生出来的星,故称新星。这个名字一直沿用至今。我国古代称这种星为"客星",在古籍中有它的记载。新星的特点是,爆发前恒星处于稳定

状态，一旦爆发，亮度迅速增加，经过一段时期又慢慢暗下来。有的星不止一次地反复爆发，称再发新星，但比较少见。

吸积和吸积盘

吸积是天体以自身的引力把周围空间中的气体、尘埃或来自伴星的物质吸引并集聚起来的过程。在X射线双星辐射机制的研究中首先提出这个过程。由于中子星或黑洞表面引力特别强，被吸积的来自伴星的物质能获得非常大的动能，这能量转化为X射线等波长的电磁辐射。对于没有磁场的致密星，或者远离强磁场的区域，吸积运动主要受致密星的引力控制。如果吸积物质的角动量很大，吸积物将围绕致密星作轨道运动，形成一个盘状物，称为吸积盘。吸积盘中的不同地方的角速度不同，离致密星越近的地方，角速度越大。盘上的物质沿着螺旋轨道向星体表面旋进。

心宿二

是天蝎座α星的中国名字，是一颗红超巨星，因色红似火得名“大火”。它的光变明显，是一颗周期为1.733天的半规则变星。

Y

陨星

特别大的流星体在它们冲向地球大气的“旅途”中不会烧完，落到地球表面成为陨星，又称陨石。陨石可分为石陨石、石铁陨石、铁陨石几大类。陨石在地球大气层中高速下降时，受到高温高压气流的冲击，有时会发生爆裂现象。爆裂后的碎块像雨点一样落向地面，叫做陨石雨。陨石着陆时撞击地面形成的坑穴，叫做陨石坑。

以太

这是一个很古老的概念。在古希腊时，把以太看成为青天或上层大

气，也用以太表示占据天体空间的物质。17 世纪的 R. 笛卡儿把以太引入科学，他认为不存在任何超距作用，必须通过某种媒介物质来传递，而以太就是充满空间的这种媒介物。经典物理认为，电磁波也必须借助绝对静止的以太来传播。在狭义相对论确立以后，人们接受了电磁场本身就是物质存在的一种形式的概念，而场是可以在真空中传播的，这样以太的概念就被抛弃了。

引力红移

根据广义相对论理论推知，当从远离引力场的地方观测时，处在引力场中的辐射源发射出来的谱线，其波长会变长一些，也即红移。只有引力场特别强的情况下，造成的红移量才能被检测出来。引力红移现象首先在引力很强的白矮星观测中得到证实。

衍射效应

衍射是一切波（声波、水波、电磁波）所共有的传播特性。这是以光线为直线传播的几何光学所不能解释的。衍射实验中让光线通过一个有小孔的障碍物投射到一个屏幕上，这束光不仅可以到达按直线传播不能到达的区域，而且在直线传播可到达的区域出现某些暗斑或暗纹。衍射使一切几何影界失去了明锐的边缘。

原子钟

原子在发生能级跃迁时会发出或者吸收一定频率的电磁波辐射，频率极其稳定。利用这一特性造成各种原子钟。其中氢原子钟和铯原子钟最为常用。国际单位制定义“1 秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间的跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间”。原子钟的稳定性已经超过 10^{-14}。

一行

唐代著名天文学家和佛学家，本名张遂（683—727）。武则天称帝时

出家为僧人,取名一行。717 年被召回京都长安主持修订历法《大衍历》,该历对太阳的周年视运动的规律描述得更符合实际情况。这是来自他利用自己监制的"黄道游仪"对日、月和五个行星的运动进行了大量观测的结果。他的一个独特的贡献是主持全国性的大规模的天文大地测量。在现今的河南省的四个地方测量了当地的北极高度和夏至时的日影长度,以及四个地方之间的距离,最后获得地球子午线 1 度相当的长度。

宇宙空间高能粒子(宇宙线)

在地球大气之外,来自宇宙空间的粒子流及其在空间传播过程中的次级产物,统称初级宇宙线。已在初级宇宙线中发现众多的元素,粒子的能量从 $10^3 \sim 10^{20}$ eV。这些粒子携带着丰富的信息,包括产生宇宙线的源以及传播路径上的银河和日地空间的物质的物理特性和与之相互作用的物理过程。初级宇宙线进入地球大气后与大气作用产生各种射线,称次级宇宙线。次级宇宙线中,原子核已破裂,质子和中子是主要成分,还有少量的电子和光子。人们在地面上观测到的宇宙线,除了中微子可能是初级宇宙线外,全部都是次级宇宙线。中微子因为穿透力特别强,不与传播路径上的物质发生作用,只有在地下的专门探测中微子的设备才有可能捕捉到少量中微子。

乙烷

为无色无臭的易燃气体,碳氢化合物,分子式为 CH_3CH_3。在天然气中约有 5%~10%的乙烷。

Z

张衡

东汉时期的天文学家(78—139)。他对天文学的主要贡献可归纳为三个方面:1. 古代对宇宙的结构有盖天说、浑天说和宣夜说。他是浑天说的代表,认为天好比是一个鸡蛋,地是蛋黄,天是蛋壳,天大地小。对

于宇宙的形成和演化，他提出天地未分以前是混混沌沌，后来轻者上升为天，重者凝结为地，由地溢出之气为星。2. 在世界上研制了第一台测量地震的候风地动仪和改进了浑天仪。3. 对多种天象进行了观测和分析，测量出月球和太阳的视直径，探明月食的原理。

祖冲之

南北朝时期杰出的数学家和天文学家(429—500)。他在数学方面的重要贡献是算出计算出圆周率 π 的真值是在 3.141 592 6 和 3.141 592 7 之间。在天文学方面，创制《大明历》，最早把岁差引进历法，这是我国历法的一个重大进步，对以后提高历法的准确性有很大的帮助。岁差是太阳和月球对地球引起的地球自转轴的长期运动，进而导致天体位置的变化。他求出木星的公转周期为 11.858 年，求出五大行星的会合周期等，都比当时通用的值更精确。

折射率

光学媒质的一个基本参量，其数值是光在真空中的速度和在媒质中的速度之比。水的折射率为 1.333，玻璃的折射率为 1.4～2。因此，光经过水、玻璃和其它媒质时，都会发生偏转。媒质的折射率随波长的不同而变化现象，称为色散。

重力波

在大气中，因重力的作用导致气块上下振荡而形成的波动称为重力波。重力波属于横波，在大气中分为外波和内波两种。以内波为例，在空气密度或气温具有一定垂直分布的大气中，一团气块受扰动可以上升。当这团气块的温度下降到低于环境温度时，气块不能上升，而在重力的作用下下降，返回原处，但因惯性它将继续下降。在此过程中的绝热压缩导致增温，超过环境温度，导致气块又重新向上运动。因此，气块将围绕平衡位置振荡，形成重力内波。

主动光学系统

大型光学望远镜的镜面会因为自重和温度变化等原因发生变化,采用自动化程度非常高的系统来进行改正,以保证镜面永远保持比较理想的形状。通常采用极光测距仪迅速测出镜面的情况,然后发出指令通过调节机构把镜面调整好。

附录 2　全天 88 个星座

古代各个文明国家或民族，为了便于观察和研究天体，把星空划分成许多区域。我国古代把天空分为中、东、西、南、北五大天官。中官分为紫微、太微和天市，共三垣。东西南北四官又叫四象，分别称做东方苍龙、北方玄武、西方白虎和南方朱雀。每一象中又分为七个星宿，共二十八星宿。这就是我国古代著名的三垣二十八宿。至今，天文学家仍然用诸如参宿四、毕宿五、心宿二、角宿一、昴星团等等古代星宿名称呼它们。

1928 年，国际天文学联合会以古希腊的星座体系为基础，补充以近代对南天星空的观测所获得的一系列南天星座名，作适当调整以后，定出 88 个星座，作为国际通用。

88 个星座中以动物命名的居多，占总数的一半，飞禽走兽，无所不有。以神话中的神仙和英雄命名的有 10 多个，占八分之一。另有 20 多个星座是以现代的仪器和器具命名的，如“罗盘”，“圆规”，“望远镜”等，这部分星座都在南天。这是因为古希腊的天文学家只在北半球观测，对南天的星空不了解。17 世纪以后，航海事业发达以后，天文学家才开始对南天的星空进行系统的观测，并用比较现代的仪器名来命名。

星座一览表

表 A.1 是全天的 88 个星座一览。其中有些星座在我国基本看不见或完全看不见的，以星号标注。上中天月日指晚 8 时，星座的中央运转至上中天的月日。

表 A.1 星座一览表

星座名	拉丁名缩写	上中天(月日)	位置
仙女座	And	11 月 27 日	北天
唧筒座	Ant	4 月 17 日	南天
*天燕座	Aps	7 月 18 日	南天
天鹰座	Aql	9 月 10 日	赤道
天坛座	Ara	8 月 5 日	南天
白羊座	Ari	12 月 25 日	赤道
御夫座	Aur	2 月 15 日	北天
牧夫座	Boo	6 月 26 日	赤道
雕具座	Cae	1 月 29 日	南天
鹿豹座	Cam	2 月 10 日	北天
摩羯座	Cap	9 月 30 日	赤道
船底座	Car	8 月 2 日	南天
仙后座	Cas	12 月 2 日	北天
半人马座	Cen	6 月 7 日	南天
仙王座	Cep	10 月 17 日	北天
鲸鱼座	Cet	12 月 13 日	赤道
*蝘蜓座	Cha	4 月 28 日	南天
猎犬座	CVn	8 月 2 日	北天
圆规座	Cir	6 月 30 日	南天
大犬座	Cma	2 月 26 日	赤道
小犬座	Cmi	3 月 11 日	赤道
巨蟹座	Cnc	3 月 26 日	赤道
天鸽座	Col	2 月 10 日	南天
后发座	Com	5 月 28 日	赤道
南冕座	CrA	8 月 25 日	南天
北冕座	CrB	7 月 13 日	赤道
乌鸦座	Crv	5 月 23 日	赤道
巨爵座	Crt	5 月 8 日	赤道
*南十字座	Cru	5 月 23 日	南天
天鹅座	Cyg	9 月 25 日	北天
海豚座	Del	9 月 26 日	赤道
*剑鱼座	Dor	1 月 31 日	南天
天龙座	Dra	3 月 28 日	北天

（续表）

星座名	拉丁名缩写	上中天(月日)	位置
小马座	Equ	10月5日	赤道
波江座	Eri	1月14日	赤道
天炉座	For	12月23日	赤道
双子座	Gem	3月3日	赤道
天鹤座	Gru	10月22日	南天
蝎虎座	Lac	10月24日	北天
天秤座	Lib	7月6日	赤道
天猫座	Lyn	3月16日	北天
武仙座	Her	8月5日	赤道
时钟座	Hor	1月6日	南天
长蛇座	Hya	4月25日	赤道
*水蛇座	Hyi	12月27日	南天
印第安座	Ind	10月7日	南天
狮子座	Leo	4月25日	赤道
天兔座	Lep	2月6日	赤道
小狮座	Lmi	4月22日	赤道
豺狼座	Lup	7月3日	南天
天琴座	Lyr	8月29日	北天
*山案座	Men	2月10日	南天
显微镜座	Mic	9月30日	南天
麒麟座	Mon	3月3日	南天
*苍蝇座	Mus	5月26日	南天
矩尺座	Nor	7月18日	南天
*南极座	Oct	10月2日	南天
蛇夫座	Oph	8月5日	赤道
猎户座	Ori	2月5日	赤道
*孔雀座	Pav	9月5日	南天
飞马座	Peg	10月25日	赤道
英仙座	Per	1月6日	北天
凤凰座	Phe	12月2日	南天
绘架座	Pic	2月8日	南天
南鱼座	PsA	10月17日	赤道
双鱼座	Psc	11月22日	赤道

(续表)

星座名	拉丁名缩写	上中天(月日)	位置
船尾座	Pup	3月13日	赤道
罗盘座	Pyx	3月31日	赤道
*网罟座	Ret	1月14日	南天
玉夫座	Scl	11月25日	赤道
天蝎座	Sco	7月23日	赤道
盾牌座	Sct	8月25日	赤道
巨蛇座	Ser	7月8日	赤道
六分仪座	Sex	4月20日	赤道
天箭座	Sge	9月12日	赤道
人马座	Sgr	9月2日	赤道
金牛座	Tau	1月24日	赤道
望远镜座	Tel	9月2日	南天
*南三角座	TrA	7月13日	南天
三角座	Tri	12月17日	赤道
*杜鹃座	Tur	11月13日	南天
大熊座	UMa	5月3日	北天
小熊座	UMi	7月13日	北天
船帆座	Vel	4月10日	南天
室女座	Vir	6月7日	赤道
*飞鱼座	Vol	3月13日	南天
狐狸座	Vul	9月20日	赤道

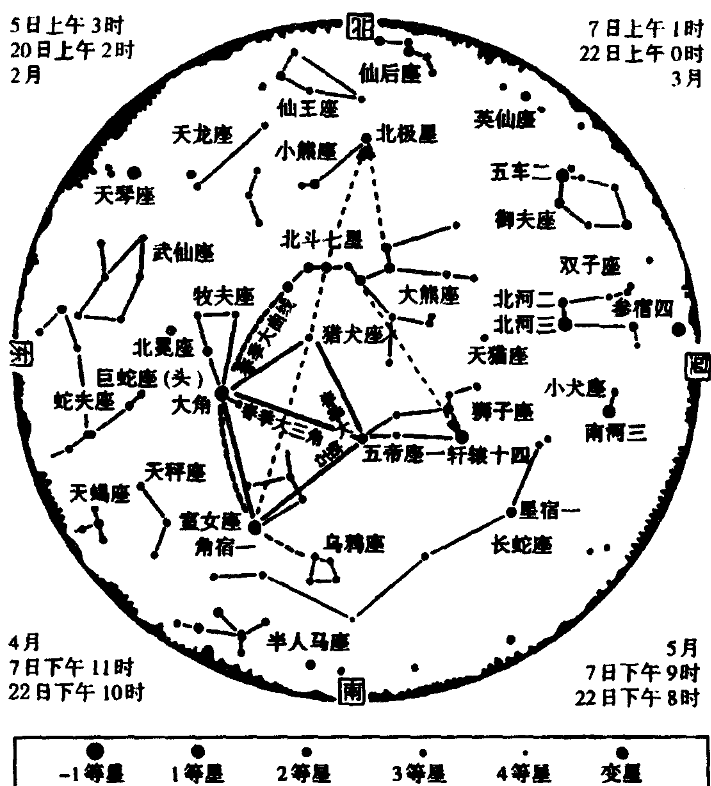
附录3　星图和四季星空

天体在天空中的分布图叫做星图。星图有多种，提供给各种不同需要的人。宇宙中有数不清的天体，作为非专业人员，我们只需把比较明亮的恒星、星云、星团、星系画在星图上。星图上都绘有坐标，通常都采用赤道坐标系，用赤经、赤纬来表示天体在天球上的位置。也有用银道坐标系和黄道坐标系来表示位置的。天体的亮度用大小不同的圆点表示。把每个星座中最亮的一些星用折线连接形成不同的图案，配以相应的星座名。实际上，每一个星座中所包含的恒星一般并不是一个家庭的成员，那些连成图案的亮星往往彼此之间也是毫无关系的，只是它们在天球上的投影比较接近罢了。但有两个星座例外，大熊座的北斗七星是同一个星团的遗迹；猎户座中大多数蓝星都处在银河系一个旋臂上。

由于太阳非常明亮，白天的天体都淹没在强烈的太阳光辉里了，只有在夜晚我们才能看见闪闪发光的天体，因此我们在地球上只能看见背着太阳方向的天空中的恒星。地球绕太阳的公转导致我们所看见的星空也随季节的变化而不同，各个季节的星空很不相同。下面按四个季节来介绍星空，并给出四个季节的星图。这组星图的特点是非常简洁，仅给出主要的星座，这对初学者非常方便。对于已经是天文爱好者的同学来说，可能已经有更详细的星图了。下面的星图是对北半球的观测者绘制的，使用时，要正对南方将星图举起来，对照星空查找星座。处在不同纬度的观测者看到的星空有差别。由于地球自转，星空每小时转了 15 度。我们在同一个地方在不同时刻看到的星空也就不一样了。由于地球绕太阳运转，每天约移动 1 度。15 天前的星空与现在的星空相比向东移了 15 度，如果提前 1 小时，我们看到的星空与 15 天前的星空是一样的。星图中四个角上标注了什么时候的星空，给出 4 个月中看到相同星空的时间。

春季星空

春季星空主要有大熊座，小熊座，狮子座和牧夫座。北极星是最为人们熟悉的恒星。它是小熊星座的 α 星。为了寻找北极星我们需要认识大熊星座和仙后座。大熊星座中有北斗七星，它们的形状像一只汤勺，所以又叫"勺"星。顺着斗勺边缘上的两颗星的连线，向着勺口方向延长五倍多远，我们就可以找到较亮的北极星。北斗七星在天空中的位置随季节的变化而不同，到了冬季，它的位置很低，不容易看到它们。然而与北斗七星遥遥相对的仙后座这时正好升起在北方的高空。可以由

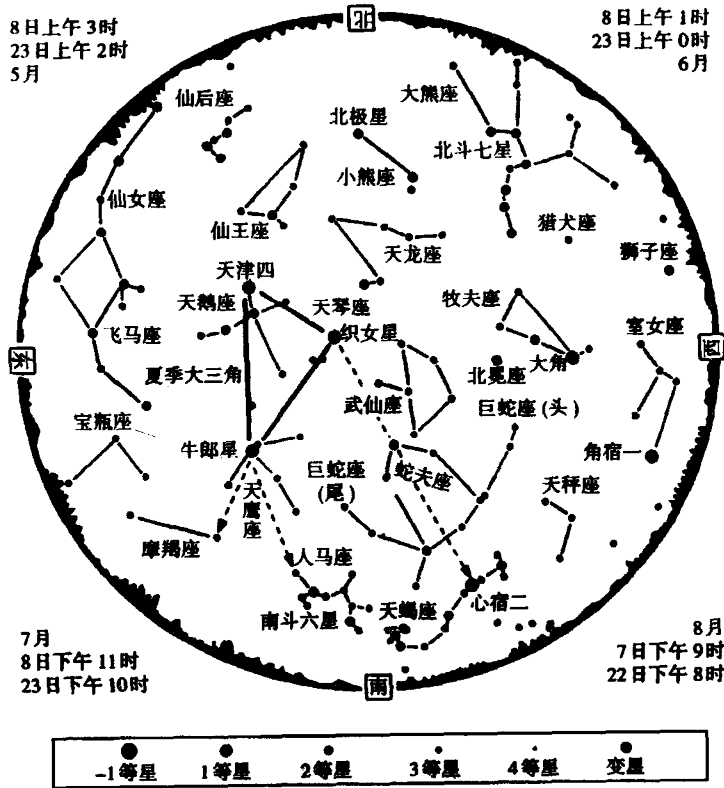


春季星空

仙后座的“W”字开口来寻找北极星。在大熊星座附近，有牧夫座，其主星是大角星，是一颗橙红色的大星。春夜，狮子座是最引人注目的。狮子座的头部由六颗星组成，像一个反写的问号(ʕ)。它的尾部则由三颗星组成一个明显的三角形。它的主星很亮，是一等星。

夏季星空

夏季的星空最重要的特点是，一条发出淡淡白光的银河横跨天空。银河是我们太阳系所在的星系。它所包含的恒星总数大约在1000亿颗以上。顺着银河看，有天鹅座、天鹰座、天琴座、人马座、天蝎座。分处银



夏季星空

河两边的牛郎星、织女星特别引人注目。牛郎星是天鹰座中最亮的星,正好在银河的东岸。织女星在银河的西岸,它是天琴座中最亮的星。牛郎星和织女星隔着银河遥遥相望。在中国古代,人们对这两颗星观察得很仔细,人们喜欢这两颗星,因此也就产生牛郎和织女渡过银河相会的故事。位于银河中的天鹅座,它的几颗亮星组成一个大"十"字形,很容易认识。其中有一颗亮星叫"天津四",是一颗 1.3 等星。天鹅座在近代高能天体物理研究中,占有重要地位。在这个星座中有一个著名的 X 射线源,天鹅座 X-1。它属于双星系统中的一颗伴星。由于其强度随时间有快速变化,可以判断为致密星。又因为这个 X 射线源的质量大大超过中子星和白矮星,可能是一个黑洞。天文学家把天鹅座 X-1 作为黑洞最可能的候选者。天蝎座样子像蝎子一样,是天空中最引人入胜的几个星座之一。天空中最典型的红巨星就在这个星座,是其中有一颗叫"心宿二"又称"大火"的红色亮星。人马座在天蝎座的东面,它的六颗亮星组成南斗六星,恰好与北斗七星遥遥相对。牧夫座中有一颗非常明亮的橙红色的恒星——大角星。

秋季星空

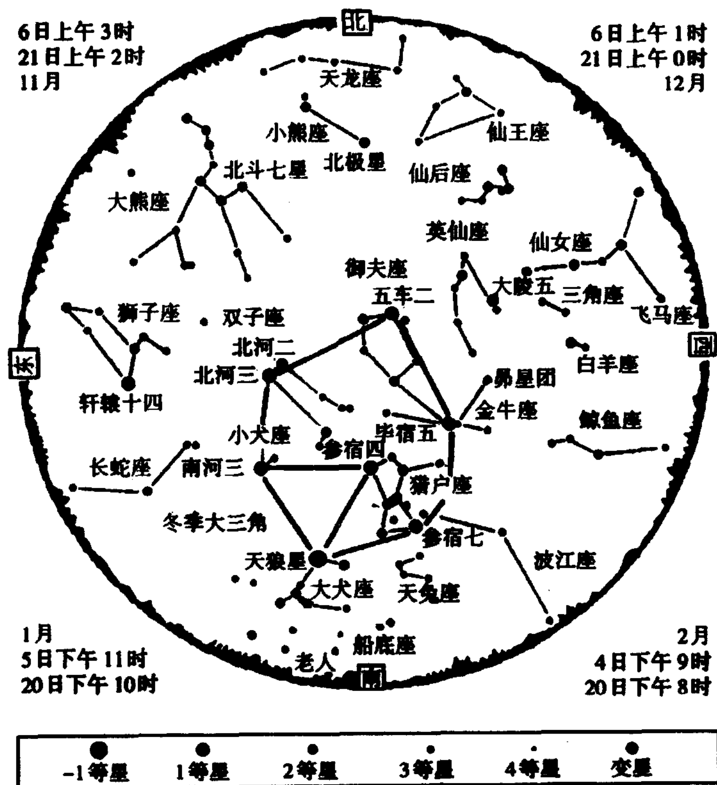
秋夜的星空不像春、夏两季的星空有那么多的明亮星座。银河已转到东北方,可以看见在银河中"游泳"的仙后座。仙后座有五颗相当明亮的恒星排列成拉丁字母"W"的形状,很像一顶美丽的皇冠,很容易辨认。仙后座的"W"字开口的一面正对着北极星,在秋冬季节,可以帮助人们寻找北极星。仙女座十分有名,在天顶偏南方向,由四颗亮星组成的大四边形中,东北角上的那颗亮星就属于仙女座。另三颗属于飞马座。仙女座大星云是人类认识的第一个银河系以外的星系。我们可以用肉眼看到仙女座中一团模糊的云雾状物质,它就是仙女座大星云。处在银河中排列像个"人"字的英仙座中,有一颗著名的食变星——大陵五(英仙 β 星),它的亮度因为伴星周期性地遮挡而变化。

秋季星空

冬季星空

冬季星空中著名的星座和恒星很多，是认星的好时间。古今中外最引人注目的猎户座高悬在东南方。星座的中间，有三颗亮星，好比猎人的腰带，民间称之为三星。这是一个亮星最多的星座。最亮的主星 α 的中国名字是参宿四，是一颗最惹人注目的红超巨星。是天文学家直接测量出直径的第一颗恒星。它的直径比太阳大 1000 倍。第二亮星 β，中名参宿七，光度比太阳强 12 万倍。三星的下面，有著名的猎户座大星云，肉眼可见。天狼星在大犬座，它是全天最亮的恒星。它也是双星系统中的主星。其伴星是第一颗被证认为白矮星的恒星，也是全天最亮的白矮

星。白矮星是一种性质特殊的恒星。半径小而密度大。后面我们还会较详细地给大家介绍这种星。金牛座在猎户座三星的西北方。这个星座中最亮的 α 星是一颗红色的恒星，中国名字叫毕宿五。金牛座中的昴星团特别美丽，它有七颗主要亮星，我国民间又称它为七姐妹星团。金牛座中还有著名的星云——蟹状星云。在这个星云中心有一颗脉冲星。蟹状星云和这颗脉冲星都是 1054 年超新星爆发的遗迹。



冬季星空

附录 4　恒星命名和全天 21 颗亮星表

古时，人们能看见的恒星比较少，只需对比较亮的星进行命名。例如我国古代给一些亮星起的名字，如天狼、北斗、大角、牛郎、织女、造父等，人们仍在继续使用。但是后来发现的恒星越来越多，命名就很困难了。不能重名又要便于记忆。目前国际流行的命名方法是，以星座当作“姓”，作为一个家族。该星座中的星以亮度排队。最亮的是老大，以希腊字母的第一个字母 α 作为“名”，老二，老三则依次用第二第三个字母 β 和 γ 作为“名”。依次类推。还有一种命名法是按其赤经的顺序，以阿拉伯数字编号。因此，现在除星座中 24 颗亮星用希腊字母表示之外，其余的星用数字表示，而数字是与亮度无关的。

表 A.2 列出 21 颗全天最亮的恒星。对初学者来说认识亮星是寻找和辨认星座的基础。亮星中大部分都是非常重要的恒星，如天狼星，其伴星是天文学家发现的第一颗白矮星。在这星表之外，还有一颗星是必须认识的，那就是北极星。地球从西往东自转，我们看到太阳东升西落，星空也在东升西落。只有北极星很特别，它正好处在地球自转轴的延长线上，不会因为地球的自转而东升西落。天上的群星都在绕北极星画出一个个大小不等的圆圈。这颗星成为人们在野外辨认方向的标志。

表 A.2　全天 21 颗亮星表

星名 α	中名	赤经 (时，分)	赤纬 (度，分)	星等	距离 (光年)	颜色
波江 α	水委一	1　37	−57　20	0.5	118	青白
金牛 α	毕宿五	4　34	+16　29	0.8	68	橙
猎户 β	参宿七	5　14	−8　13	0.1	900	青白
御夫 α	五车二	5　15	+46　00	0.1	45	黄
猎户 α	参宿四	5　54	+7　24	0.4	520	红
船底 α	老人	6　23	−52　41	−0.7	约 200	白

(续表)

星名α	中名	赤经 (时,分)	赤纬 (度,分)	星等	距离 (光年)	颜色
大犬α	天狼	6 44	−16 37	−1.4	8.7	白
小犬α	南河三	7 38	+5 18	0.4	11.3	淡黄
双子β	北河三	7 44	+28 05	1.2	35	橙
狮子α	轩辕十四	10 07	+12 04	1.3	84	青白
南十字α	十字架二	12 25	−63 00	0.8	370	青白
南十字β	十字架三	12 46	−59 28	1.3	490	青白
室女α	角宿一	13 24	−11 03	1.0	220	青白
半人马β	马腹一	14 02	−60 16	0.6	490	青白
牧夫α	大角	14 14	+19 20	−0.1	36	橙
半人马α	南门二	14 39	−60 46	−0.3	4.3	黄
天蝎α	心宿二	16 27	−26 24	0.9	520	红
天琴α	织女一	18 36	+39 02	0.0	26.5	白
天鹰α	河鼓二 (牛郎星)	19 49	+8 48	0.8	16.0	白
天鹅α	天津四	20 40	+45 12	1.3	1600	白
南鱼α	北落师门	22 56	−29 43	1.2	22.6	白

附录 5 梅西叶天体

在各讲中经常提到 M 天体这个名词。M 天体即梅西叶天体。查理斯·梅西叶是 18 世纪法国天文学家，一生热心于搜寻彗星的工作，在寻彗的过程中发现了许多星云、星团，还有星系，把它们总结归纳在一个星表中，成为著名的梅西叶星表，见表 A.3—A.5，共 110 个天体。当时他并没有搞清楚这些天体的差别。

梅西叶星表是 200 多年以前的产物，表中所列天体的亮度大多都在 10 等以内，使用小型天文望远镜都可以看到。这 110 个 M 天体是 NGC 星表和 IC 星表内 1 万多个星云、星团、星系中的精华，是天空中最壮观、最漂亮的天体。因此，多年来 M 天体一直受到广大天文爱好者的喜爱，成为他们经常观测和拍摄的对象。

除了 M40 是属于恒星类的双星外，其它 109 个梅西叶天体可归纳为三类天体：星云类、星团类和星系类。

1. 星云类包括超新星遗迹，弥漫气体星云和行星状星云共 12 个；
2. 星团类共 57 个，其中疏散星团 28 个，球状星团 29 个；
3. 河外星系共 40 个，其中有旋涡星系、椭圆星系，也有不规则星系。

表 A.3 梅西叶天体表(超新星遗迹、弥漫星云和行星状星云)

编号	NGC	赤经(2000)	赤纬(2000)	尺度(角分)	视星等	星座	类型或名称
M1	1952	05 34.5	+22 01	6×4	8.4	金牛座	蟹状星云
M8	6523	18 03.8	−24 23	90×40	5.8	人马座	礁湖星云
M16	6611	18 18.8	−13 47	35	6.0	巨蛇座	鹰状星云
M17	6618	18 20.8	−16 11	46×37	7.0	人马座	奥米加星云
M20	6514	18 02.3	−23 02	29×27	6.3	人马座	三叶星云
M27	6853	19 59.6	+22 43	8×4	8.1	狐狸座	哑铃星云
M42	1976	05 35.4	−05 27	66×60	4	猎户座	猎户座大星云
M43	1982	25 35.6	−05 16	20×15	9	猎户座	弥漫星云
M57	6720	18 53.6	+33 02	1	9.0	天琴座	环状星云
M76	651	01 42.4	+51 34	2×1	12.2	英仙座	行星状星云
M78	2068	05 46.7	+00 03	8×6	8	猎户座	弥漫星云
M97	3587	11 14.8	+55 01	3	12.0	大熊座	行星状星云

表 A.4 梅西叶天体表(疏散星团和球状星团)

编号	NGC	赤经(2000)	赤纬(2000)	尺度(角分)	视星等	星座	类型或名称
M2	7089	21 33.5	−00 49	13	6.5	宝瓶座	球状星团
M3	5272	13 42.5	+28 23	16	6.4	猎犬座	球状星团
M4	6121	16 23.6	−26 32	26	5.9	天蝎座	球状星团
M5	5904	15 18.6	+02 05	17	5.8	巨蛇座	球状星团
M6	6405	17 40.1	−32 13	15	4.2	天蝎座	疏散星团
M7	6475	17 53.9	−34 49	80	3.3	天蝎座	疏散星团
M9	9333	17 19.2	−18 31	9	7.9	蛇夫座	球状星团
M10	6254	16 57.1	−04 06	15	6.6	蛇夫座	球状星团
M11	6705	18 51.1	−06 16	14	5.8	盾牌座	疏散星团
M12	6218	16 47.2	−01 57	15	6.6	蛇夫座	球状星团
M13	6205	16 41.7	+36 28	17	5.9	武仙座	球状星团
M14	6402	17 37.6	−03 15	12	7.6	蛇夫座	球状星团
M15	7078	21 30.0	+12 10	12	5.4	飞马座	球状星团
M18	6613	18 19.9	−17 08	9	6.9	人马座	疏散星团
M19	6273	17 02.6	−26 16	14	7.2	蛇夫座	球状星团
M21	6531	18 04.6	−22 30	13	5.9	人马座	疏散星团
M22	6656	18 36.4	−23 54	24	5.1	人马座	球状星团
M23	6494	17 56.8	−19 01	27	5.5	人马座	疏散星团
M24	6603	18 18.4	−18 25	90	4.5	人马座	疏散星团
M25	IC4725	18 31.6	−19 15	32	4.6	人马座	疏散星团
M26	6694	18 45.2	−09 24	15	8.0	盾牌座	疏散星团
M28	6626	18 24.5	−24 52	11	6.9	人马座	球状星团
M29	6913	20 23.9	+38 32	7	6.6	天鹅座	疏散星团
M30	7099	21 40.4	−23 11	11	7.5	魔羯座	球状星团
M34	1039	02 42.0	+42 47	35	5.2	英仙座	疏散星团
M35	2168	06 08.9	+24 20	28	5.1	双子座	疏散星团
M36	1960	05 36.1	+34 08	12	6.0	御夫座	疏散星团
M37	2099	05 52.4	−32 33	24	5.6	御夫座	疏散星团
M38	1912	05 28.7	+35 50	21	6.4	御夫座	疏散星团
M39	7092	21 32.2	+48 26	32	4.6	天鹅座	疏散星团
M41	2287	06 47.0	−20 44	38	4.5	大犬座	疏散星团
M44	2632	08 40.1	+19 59	95	3.1	巨蟹座	鬼星团(疏散)
M45	—	23 47.0	+24 07	110	1.2	金牛座	昴星团(疏散)

（续表）

编号	NGC	赤经(2000)	赤纬(2000)	尺度(角分)	视星等	星座	类型或名称
M46	2437	07 41.8	−14 49	27	6.1	船尾座	疏散星团
M47	2422	07 36.6	−14 30	30	4.4	船尾座	疏散星团
M48	2548	08 13.8	−05 48	54	5.8	长蛇座	疏散星团
M50	2323	07 03.2	+08 20	16	5.9	麒麟座	疏散星团
M52	7654	23 24.2	+61 35	13	6.9	仙后座	疏散星团
M53	5024	13 12.9	+18 10	13	7.7	后发座	球状星团
M54	6715	18 5.1M	−30 29	9	7.7	人马座	球状星团
M55	6809	19 40.0	−30 58	19	7.0	人马座	球状星团
M56	6779	19 16.6	+30 11	7	8.2	天琴座	球状星团
M62	6266	17 01.2	+30 07	14	8.8	蛇夫座	球状星团
M67	2682	08 50.4	+11 49	30	6.9	巨蟹座	疏散星团
M68	4590	12 39.5	+26 45	12	8.2	长蛇座	球状星团
M69	6637	18 31.4	−32 21	4	7.7	人马座	球状星团
M70	6681	18 43.2	−32 18	8	8.1	人马座	球状星团
M71	6838	19 53.9	+18 47	7	8.3	天箭座	球状星团
M72	6981	20 53.5	−12 32	6	9.4	宝瓶座	球状星团
M73	6994	20 59.0	−12 38	3	8.9	宝瓶座	疏散星团(4合星)
M75	6864	20 06.1	−21 55	6	8.6	人马座	球状星团
M79	1904	05 245	+24 33	9	8.0	天兔座	球状星团
M80	6093	16 17.1	+22 59	9	7.2	天蟹座	球状星团
M92	6341	17 17.1	+43 08	11	6.5	武仙座	球状星团
M93	2447	07 44.6	+23 52	22	6.2	船尾座	疏散星团
M103	581	01 33.2	+60 42	6	7.4	仙后座	疏散星团
M107	6171	16 32.5	−13 03	10	8.1	蛇夫座	球状星团

表 A.5　梅西叶天体表(星系)

编号	NGC	赤经(2000)	赤纬(2000)	尺度(角分)	视星等	星座	类型或名称
M31	224	00 42.7	+41 16	178×63	3.4	仙女座	仙女座星系
M32	221	00 42.7	+40 52	8×6	8.2	仙女座	椭圆星系
M33	598	01 33.9	+30 39	62×39	5.7	三角座	旋涡星系
M49	4472	12 29.8	+08 00	9×7	8.4	室女座	椭圆星系
M51	5194	13 29.9	+47 12	11×8	8.8	猎犬座	旋涡星系
M58	4579	12 37.7	+11 49	5×4	9.8	室女座	旋涡星系

(续表)

编号	NGC	赤经(2000)	赤纬(2000)	尺度(角分)	视星等	星座	类型或名称
M59	4621	12 42.0	+11 39	5×3	9.8	室女座	椭圆星系
M60	4649	12 43.7	+11 33	7×6	8.8	室女座	椭圆星系
M61	4303	12 21.9	+04 28	6×6	6.6	室女座	旋涡星系
M63	5055	13 15.8	+42 02	12×8	8.6	猎犬座	旋涡星系
M64	4826	12 56.7	+21 41	9×5	8.5	后发座	旋涡星系
M65	3623	11 18.9	+13 05	10×3	9.3	狮子座	旋涡星系
M66	2627	11 20.2	+12 59	9×4	9.0	狮子座	旋涡星系
M74	628	01 36.7	+15 47	10×10	9.2	双鱼座	旋涡星系
M77	1068	02 42.7	−00 01	7×6	8.8	鲸鱼座	旋涡星系
M81	3031	09 55.6	+69 04	26×14	6.9	大熊座	旋涡星系
M82	3034	09 55.8	+69 41	11×5	8.4	大熊座	不规则星系
M83	5236	13 37.0	−18 52	11×10	8.0	长蛇座	旋涡星系
M84	4374	12 25.1	+12 53	5×4	9.3	室女座	椭圆星系
M85	4382	12 25.4	+18 11	5×5	9.2	后发座	椭圆星系
M86	4406	12 26.2	+12 57	5×6	9.2	室女座	椭圆星系
M87	4486	12 30.8	+12 24	7×7	8.6	室女座	椭圆星系
M88	4501	12 32.0	+14 25	7×4	9.5	后发座	旋涡星系
M89	4552	12 35.7	+12 33	4×4	9.8	室女座	椭圆星系
M90	4569	12 36.8	+13 10	10×5	9.5	室女座	旋涡星系
M91	4548	12 35.4	+14 30	5×4	10.2	后发座	旋涡星系
M94	1736	12 50.9	+41 07	11×9	8.2	猎犬座	旋涡星系
M95	3351	10 44.0	+11 42	7×5	9.7	狮子座	棒旋星系
M96	3368	10 46.8	+11 49	7×5	9.2	狮子座	旋涡星系
M98	4192	12 13.8	+14 54	10×3	10.1	后发座	旋涡星系
M99	4254	12 18.8	+14 25	5×5	9.8	后发座	旋涡星系
M100	4321	12 22.9	+15 49	7×6	9.4	后发座	旋涡星系
M101	5457	14 03.2	+54 21	27×26	7.7	大熊座	旋涡星系
M102	5866	15 06.5	+55 46	5×2	11.1	天龙座	透镜星系
M104	4594	12 40.0	−11 37	8×4	9.0	室女座	草帽星系
M105	3379	40 47.8	+12 35	5×4	9.3	狮子座	椭圆星系
M106	4258	12 19.0	+47 18	18×8	8.3	猎犬座	旋涡星系
M108	3556	11 11.5	+55 40	8×3	10.1	大熊座	旋涡星系
M109	3992	11 57.6	+53 23	8×5	9.8	大熊座	棒旋星系
M110	205	00 40.4	+41 41	17×10	8.0	仙女座	椭圆星系

附录 6　天体的视运动和天球赤道坐标系

1. 天体的视运动和天球

只要你稍加注意，就会发现天空中几乎所有的天体，包括月亮和行星都有每天自东向西的运动。这是由于地球在不断地自转造成的，显得整个星空在绕地球的自转轴旋转。天体的这种运动称为天体的周日视运动，而不是天体的真正运动。

由于天体离我们太远，用肉眼或望远镜观看，分不清它们的远近，好像所有天体都镶嵌在无穷远处的球面上。这个球面就是一个假想的但却很有用的"天球"。天体的真实运动称为自行，所有天体都有自行。由于它们离地球太远，即使速度达到每秒几千公里，短时期内也不会明显看出它们在天球上的移动，因此可以认为恒星是固定在天球上的。虚拟的天球成为人们研究天体位置的一个十分方便的方法。

地球的自转形成日夜交替，地球自转一周的时间为一天。地球绕太阳一周为一年，要经过 365.2422 个太阳日。地球绕太阳运动导致星空周期性地变化。

我们坐在快速行驶的火车上可以从路旁景物迅速地后退判断火车在运动。地球在轨道上运动，如果两旁有各种景物，我们也可以判断地球在运动。但地球的近处没有任何景物。只有远处的星空可以作为参照物。星空的四季变化表明地球围绕太阳的周年运动。由于地球是绕太阳运动，所以太阳在天球上的位置不断地自西向东移动，每年环绕天球一周。太阳在天球上的轨迹称为黄道。

2. 天球赤道坐标系

确定天体在天球上的位置也如同确定地球上某个城市的位置一样，

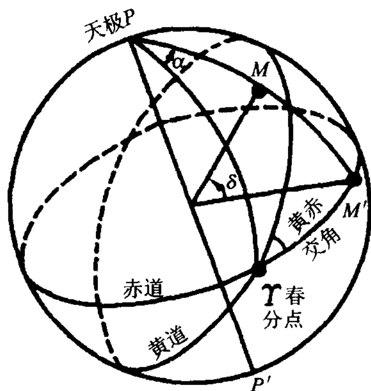
需要用一定的坐标系。由于天球和地球都是球面,采用球面坐标系最为方便。天球赤道坐标系基本上套用地球地理坐标系,具有很大的优点,也比较容易理解。

天球上有天赤道,它是地球赤道面无限延展与天球相交的大圆。天球上有南天极和北天极,是地球自转轴无限延长与天球相交的两个点。地球上的经圈平面和纬圈平面的无限延伸与天球相交形成天球的赤经圈和赤纬圈。

天体在天球中的位置是观测者和天体的连线与天球的交点。严格地说,应该是从地球中心和天体的连线与天球的交点。不过,这两种方法得到的位置的差别太小了,可以忽略不计。

天球赤道坐标系与地球地理坐标系不同之点在于采用不同的经圈作为起始点。地理坐标定义英国格林尼治天文台处的经圈为本初经圈,其经度为零度。但是天球赤道坐标系的本初经圈是从春分点起算,沿与天体东升西落相反的方向以时、分、秒计算。这是表示角度的另一种方法。24 小时相当于 360 度,1 小时等于 15 度($1^h=15°$),很容易换算。赤纬的算法是从天球赤道开始至两极止,向北由 0 度至 +90 度,向南由 0 度至 -90 度。这与地球的地理纬度是一样的。

图中 M 点是待测天体,其位置用赤经(α)和赤纬(δ)表示。通过北天极 P 和 M 点作大圆相交与天赤道的 M' 点,弧长 MM' 称为 M 点的赤纬,春分点到 M' 的弧长称为 M 点的赤经。



春分点是天球坐标系中的一个特殊的点。太阳在天球上的视运动轨道称为黄道,黄道面与天球赤道面之间有 23.5°的夹角。赤道面与黄道面在天球上的两个交点,一个称为春分点,另一个称为秋分点。每年春季太阳视运动经过春分点。春分点用白羊座的符号表示。在赤道坐标系中,春分点

也随地球自转而东升西落，待确定位置的天体也东升西落，所以春分点与待测天体的距离不变。因此天体的坐标值不会随时间变化，也与观测地点的位置无关，这是天球赤道坐标系的最大优点。天球赤道坐标系的基本圈和基本点不够直观，但是只要对地球的赤道、南北极及经纬度有了解，就不难理解天球赤道坐标系。

天球坐标系还有黄道坐标系、地平坐标系和银道坐标系等。但是坐标系之间是可以彼此转换的。这里只介绍最常采用、最容易理解的天球赤道坐标系。

附录 7　天文学大事记

公元前 380 年，希腊哲学家柏拉图建立了地心学说，人类受这一错误观点影响长达 2000 年之久。

公元 150 年，希腊天文学家托勒密在《天文学大成》中详细论证了地心体系，他的观点一直流传了 1500 年。

1054 年，中国的天文学家记录了一颗突然出现的明亮的星星。现代天文学家证实它是一颗超新星爆发，金牛座蟹状星云是它的遗迹。1054 年超新星也被人们称为中国新星。

1543 年，波兰天文学家哥白尼的《天体运行论》发表，日心说问世。

1609 年，意大利科学家伽利略发明天文望远镜。

1609 年，德国天文学家开普勒发表行星运动第一、第二定律。

1610 年，意大利科学家伽利略首次使用望远镜观测星空，得到许多发现，如月面上的环形山、木星的四颗卫星、银河由恒星组成等等。

1619 年，德国天文学家开普勒发表行星运动第三定律。

1655 年，荷兰天文学家惠更斯发现土星光环。

1668 年，英国科学家牛顿发明反射式天文望远镜。

1672 年，英国科学家牛顿发现白光的光谱。

1705 年，英国天文学家哈雷发现周期彗星。

1761 年，俄国科学家罗蒙诺索夫发现金星有大气。

1781 年，德籍英国天文学家威廉·赫歇尔发现天王星。

1781 年，法国天文学家梅西叶发表《星云星团表》。

1785 年，德籍英国天文学家威廉·赫歇尔完成恒星计数并提出银河系的模型。

1801 年，意大利天文学家皮亚齐发现第一颗小行星——谷神星。

1814 年，德国科学家夫琅禾费发明了分光镜，随后他又发现了太阳光谱

的吸收线。

1843年，德国天文爱好者施瓦布发现太阳黑子周期。

1844年，德国天文学家贝塞尔发现天狼星和南河三都是双星，各有一看不见的伴星。

1845年，爱尔兰天文学家罗斯伯爵建成口径1.84米的巨型反射望远镜，并发现M51具有旋涡结构。

1846年，德国天文学家伽勒根据法国天文学家勒威耶通过计算所得到的海王星位置(英国天文学家亚当斯也完成了同样的计算)发现了海王星。

1859年，德国科学家基尔霍夫建立分光学的基本定律，成为天体物理学的基础之一。

1887年，美国天文学家霍尔发现火星的两颗卫星。

1897年，美国叶凯士天文台建成世界最大的、口径1.02米的折射望远镜。

1912年，美国女天文学家勒维特发现造父变星的周光关系。

1911～1913年，丹麦天文学家赫茨普龙和美国天文学家罗素各自独立地得到表明恒星光度和光谱型之间关系图，简称赫罗图。赫罗团在恒星起源和演化的研究中起到了举足轻重的作用。

1915年，爱因斯坦发表广义相对论，作出光线在引力场中会发生偏转现象的预言。

1918年，美国天文学家沙普利发现太阳不在银河系的中心，他提出新的银河系模型，得到公认。

1924年，美国天文学家哈勃发现仙女座大星云是银河系之外的与银河系一样的恒星系统。

1926年，英国天文学家爱丁顿出版《恒星内部结构》专著，这本书成为恒星结构理论的经典著作。

1929年，哈勃通过测定河外星系的谱线红移，发现著名的哈勃定律。星系的距离越远，红移越大，表明越远的星系退行的速度越大，意味着宇宙在膨胀。

1931 年,美国天文学家汤博发现冥王星。

1931 年,印度裔美国天体物理学家钱德拉塞卡研究白矮星结构。

1931 年,美国无线电工程师央斯基首次发现了来自银河系中心方向的射电辐射。

1931 年,德国科学家施密特发明施密特望远镜。

1932 年,苏联物理学家朗道提出宇宙空间中可能有完全由中子组成的致密星。

1934 年,巴德和兹威基分别提出了中子星的概念。

1934 年,印度裔美国天体物理学家钱德拉塞卡利用简并电子气体的物态方程,建立起白矮星模型。在这个模型中,白矮星的质量不会大于太阳质量的 1.44 倍,后来人们称白矮星的这一质量上限为钱德拉塞卡极限。

1936 年,奥地利物理学家黑斯因发现宇宙线而荣获诺贝尔物理学奖。他于 1911~1912 年,用气球把"电离室"送到离地面五千多米的高空,进行大气导电和电离的实验,发现了来自地球之外的宇宙线。

1936 年,美国核物理学家贝特提出了太阳内部氢聚变反应的"碳—氮—氧循环",为恒星内部结构和恒星演化学的研究奠定了基础。

1937 年,美国天文学家兼无线电工程师韦伯研制成世界上第一架射电望远镜,抛物面天线的口径为 9.45 米。

1939 年,奥本海默和沃尔科夫通过计算建立了第一个中子星的模型。

1942 年,荷兰天文学家奥尔特论证蟹状星云是 1054 年超新星遗迹。

1948 年,美国帕洛玛山天文台口径 5 米反射望远镜建成,后来被命名为海耳望远镜。

1948 年,美籍俄裔天文学家伽莫夫提出宇宙大爆炸模型。他的研究生阿尔夫和赫尔曼根据这个模型计算得到宇宙背景中存在温度为 5 K 的微波辐射。

1948 年,瑞典天体物理学家阿尔文出版《宇宙动力学》专著,创立了宇宙磁流体力学的基本原理。

1952 年,英国射电天文学家赖尔提出建造综合孔径射电望远镜的思想。

1954 年，英国天文学家布莱思按照赖尔的思路在剑桥大学建成第一台综合孔径射电望远镜。

1956 年，美国核物理学家福勒等人发表了“星体元素的合成法”重要论文，得出在恒星内部的核反应中生成各种重元素的理论。

1957 年，苏联发射世界第一颗人造卫星。

1957 年，美国物理学家汤斯预言星际分子的存在，并列出 17 种可能存在的星际分子。

1959 年，苏联“月球三号”卫星首次拍到月球背面的照片。

1960 年，剑桥大学建成了等效直径为 1.6 千米的综合孔径射电望远镜。

1961 年，苏联发射第一颗载人卫星，宇航员尤里·加加林成为第一位太空人。

1961 年，澳大利亚国家射电天文台建成口径 64 米的大型射电望远镜。

1963 年，汤斯在实验室里测出羟基(OH)的两条处在射电频段的谱线。

1963 年，应用射电天文方法首次发现了存在于星际空间的无机分子和有机分子。

1963 年，美国天文学 M. 施米特发现了类星体。类星体的视角径很小，像恒星一样，但是它们的谱线红移都很大，其距离大都在 100 亿光年～200 亿光年之间，是宇宙中最遥远的天体。

1963 年，世界最大的、口径 305 米的射电望远镜在美国阿雷西博建成。

1964 年，汤斯因研制微波激射器获诺贝尔物理学奖。

1965 年，美国天文学家彭齐亚斯和威尔逊发现了 3 K 宇宙微波背景辐射。

1967 年，英国天文学家休伊什和贝尔发现了脉冲星，并且把脉冲星证认为自转的中子星。

1967 年，美国物理学家贝特因核反应理论的研究而获诺贝尔物理学奖。

1969 年，美国“阿波罗”11 号宇宙飞船的 2 名宇航员首次登上月球。以后又有 5 艘“阿波罗”号宇宙飞船的共 10 名宇航员陆续登上月球，对月球进行了较全面的考察。

1970 年，中国第一颗人造卫星上天。

1970 年，瑞典天文学家阿尔文因创建太阳和宇宙磁流体力学而荣获诺贝尔物理学奖。

1971 年，苏联第一个空间站——“礼炮”1 号发射成功。

1971 年，剑桥大学建成了等效直径为 5 千米的综合孔径射电望远镜。

1973 年，美国“天空实验室”发射升空，拍摄的大量的太阳照片极为成功。

1974 年，英国天文学家赖尔因发明综合孔径射电望远镜和对极其遥远的射电星系的观测而荣获诺贝尔物理学奖。

1974 年，美国天文学家泰勒和赫尔斯发现了第一个射电脉冲双星系统 PSR1913 + 16。

1974 年，英国天文学家休伊什因发现脉冲星而荣获诺贝尔物理学奖。

1976 年，美国“海盗”1 号、2 号探测器在火星表面软着陆，对火星进行实地考察。

1977 年，美国发射“旅行者”1 号和 2 号宇宙飞船，对太阳系外部空间进行探测，并分别给它们携带了寻访地外文明的“唱片”。

1978 年，美国天文学家威尔逊和彭齐亚斯因发现宇宙微波背景辐射而荣获诺贝尔物理学奖。

1981 年，美国第一架航天飞机“哥伦比亚”号发射成功。

1983 年，美籍印度裔天文学家钱德拉塞卡因创建恒星结构和演化理论，确认白矮星质量上限而荣获诺贝尔物理学奖。

1983 年，美国天文学家福勒因创建恒星演化过程中的化学元素形成的理论而荣获诺贝尔物理学奖。

1986 年，美国“挑战者”号航天飞机失事。

1986 年，哈雷彗星回归，欧洲空间局的“乔托”号等 5 架探测器对它进行了空间探测，“乔托”号穿越彗发，拍摄下彗核的照片。

1989 年，美国发射“麦哲伦”号金星探测器，它在 1990～1994 年期间对金星进行了近距离的考察。

1989 年，美国发射“伽利略”号木星探测器，1995 年到达木星附近对木星及其卫星进行近距离探测。2003 年在木星大气层中坠毁。

1989 年，中国最大的、口径 2.16 米天文望远镜在北京天文台兴隆观测站

落成。

1990年，美国哈勃空间望远镜发射升空，设计寿命为10年，但至今仍在太空正常工作。

1990年，德、美、英联合发射伦琴X射线天文卫星。

1991年，美国发射康普顿γ射线天文台。

1992年，美国在夏威夷建成口径10米、由36片小镜组成的凯克1号望远镜。1996年又在那儿建成与凯克1号完全一样的凯克2号望远镜。

1993年，美国天文学家赫尔斯和J·泰勒因发现射电脉冲双星和间接验证爱因斯坦广义相对论中预言的引力辐射的存在荣获诺贝尔物理学奖。

1994年，苏梅克—利维彗星撞击木星，全世界许多天文台和空间望远镜都对它作了跟踪观测。

1995年，欧洲空间局发射红外空间天文台。

1996年，美国发射“火星探路者”号和“火星环球勘测者”号探测器，1997年对火星作了成功的考察。

1997年，中国的“大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜”(LAMOST)正式立项。

1998年，欧洲南方天文台甚大望远镜(VLT)4架望远镜中的第一架建成，后面三架望远镜陆续在1999年和2000年建成。

1999年，日本的口径8.3米反射式望远镜“昴星团”建成。

1999年，美国发射钱德拉X射线天文台。

2002年，美国天文学家里卡尔多·贾科尼因在发现宇宙X射线源方面取得的成就以及美国天文学家雷蒙德·戴维斯和日本天文学家小柴昌俊因在探测宇宙中微子方面取得的成就，三人共同荣获该年度诺贝尔物理学奖。

2003年，中国“神舟”5号载人飞船发射成功，中国第一位进入太空的宇航员是杨利伟。

2003年，中国航天部宣布三年内发射月球探测卫星——“嫦娥”1号。

2003 年,2 月 1 日美国“哥伦比亚”号航天飞机失事。

2004 年,美国 2003 年发射的“勇气”号和“机遇”号双胞胎火星漫游车于 2004 年 1 月在火星表面成功着陆。

2004 年,欧洲空间局 2003 年发射的“火星快车”于 2004 年 1 月抵达绕火星的轨道,它携带的“猎兔犬”2 号在火星着陆未能成功。

2004 年,探测土星的“卡西尼”飞船于 7 月 1 日进入绕土星运转的轨道,开始对土星进行长达 4 年的探测。